



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학박사 학위논문

교통류 상황변화에 따른 혼잡통행료
추정 및 평가에 관한 연구

- 부산광역시 제1도시고속도로를 대상으로 -

*Prediction and Evaluation of Congestion Toll According
to Variations in Traffic Flow Conditions*

- Based on the 1st Urban Freeway in Busan City -

지도교수 김 태 곤

2008년 8월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과 김 승 길

本 論文을 김승길의 工學博士 學位論文으로 認准함.

위원장 이 중 우 (인)

위 원 경 갑 수 (인)

위 원 김 태 형 (인)

위 원 이 상 국 (인)

위 원 김 태 곤 (인)

2008년 8월

한국해양대학교 대학원

목 차

목 차	i
Nomenclature	iii
List of Tables	vi
List of Figures	viii
Abstract	x
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 필요성	2
1.3 연구내용 및 수행과정	3
제 2 장 선행연구 고찰	6
2.1 혼잡통행료에 대한 고찰	6
2.2 교통류모형에 대한 고찰	14
2.3 통행시간가치에 대한 고찰	30
제 3 장 자료수집 및 특성분석	43
3.1 자료수집 및 분석방법	43
3.2 교통특성 분석	47
3.3 교통특성 상호관계 분석	62

제 4 장 혼잡통행료 모형구축 및 추정	80
4.1 혼잡통행료 이론 및 산정함수 도출	80
4.2 혼잡통행료 모형 구축 및 선정	88
4.3 혼잡통행료 추정 및 평가	99
제 5 장 결 론 및 향후 연구과제	116
5.1 결 론	116
5.2 향후 연구과제	118
참 고 문 헌	120
Appendix	125
Appendix A. Flow-speed-density scatter-plot matrices	126
Appendix B. Re-specifications of speed-density and flow-speed function relationships	128
Appendix C. Speed elasticity of flow and congestion toll estimations for flow-speed models	129

Nomenclature

q	Flow rate(veh/h)
u	Space mean speed(km/h)
k	Density(veh/km)
u_f	Free-flow speed(km/h)
k_j	Jam density, the density at which all movement stops(veh/km)
q_m	Maximum flow rate, capacity(veh/h)
u_m	Critical speed, the speed at which capacity occurs(km/h)
k_m	Critical density, the density at which capacity occurs(veh/km)
β, δ	real number($\beta, \delta > 0$)
λ	Marginal utility of income
μ	Marginal utility of time
ϕ	Marginal utility according to the minimum input time reduction
ψ_i	Marginal utility according to the needed time reduction of activity i
q_T	Average flow rate of total lane(pc/h)
v_i	15min. volume($veh/15min$)
f_{HV_i}	Heavy-vehicle adjustment i lane
P_{T1}	Proportion of medium size vehicles(%)
P_{T2}	Proportion of large size vehicles(%)
E_{T1}	Passenger-car equivalent of medium size vehicles(1.5)
E_{T2}	Passenger-car equivalent of large size vehicles(2.0)
n_i	Volume of j speed interval for 15min. unit time ($pc/15min$)
u_i	Time mean speed of j speed interval for 15min. unit time(km/h)
u_t	Time mean speed(km/h)

u_s	Space mean speed(km/h)
v_{ij}	Volume of j speed interval in i lane for 15min. unit time($pc/15min$)
$u_{t_{ij}}$	Time mean speed of j speed interval in i lane for 15min. unit time(km/h)
u_T	Space mean speed of total lane(km/h)
i	Lane number($n = 2$)
j	Speed interval($n = 14$)
h	Average headway time for 15min.(sec)
t_i	Arrival time of i th vehicle(sec)
t_{i-1}	Arrival time of $i-1$ th vehicle(sec)
h_i	Average headway time for 15min. of i lane(sec)
k_T	Average density of total lane(pc/km)
$D(q)$	Demand function of flow
$AC(q)$	Average cost function of flow
$MC(q)$	Marginal cost function of flow
$TC(q)$	Total cost function of flow
d	Operating distance(km)
c	Generalized cost
r	Congestion toll
ϵ_u^q	Speed elasticity of flow
ϵ_u^k	Speed elasticity of density
y	Dependent variable, the space mean speed of total lane(u_T)
x	Independent variable, the average density of total lane(k_T)
b_0	Regression coefficient(km/h)
b_1	Regression coefficient($km^2/pc \cdot h$)
R^2	Determination coefficient
S_e	Standard error of estimate

$MWRM$	Marginal wage rete method
$MRSM$	Marginal rate of substitution method
V_B	Time value of business travel
V_N	Time value of non-business travel
W	Monthly average marginal wage(<i>won/month</i>)
T	Monthly average labor time(<i>hour/month</i>)
α	Time value percentage of business travel for non-business travel
β_1, β_2	Parameter of utility function
MRS	Marginal rate of substitution
$\partial V/\partial t$	Marginal utility for travel time
$\partial V/\partial c$	Marginal utility for travel cost
$Time_{ijm}$	Total travel time between zone i and j of mode m
$COST_{ijm}$	Total travel cost between zone i and j of mode m
D_m	Dummy of mode m
a_1, a_2, a_n	Parameter coefficient

List of Tables

Table 2. 1	Congestion toll implementation instance	13
Table 2. 2	Characteristics of single regime models and multi regime models ...	23
Table 2. 3	Travel time value of U.K.	35
Table 2. 4	Travel time value of Germany	36
Table 2. 5	Intercity travel time value of private travel(Norway)	37
Table 2. 6	Intracity travel time value of private travel(Norway)	37
Table 2. 7	Intercity travel time value of business travel(Norway)	37
Table 2. 8	Intracity travel time value of business travel(Norway)	37
Table 2. 9	Travel time value of U.S.A.	38
Table 2.10	Travel time value of Japan	39
Table 2.11	Study of travel time value estimation in Korea	42
Table 3. 1	Geometric characteristics within the influence area	44
Table 3. 2	Speed intervals and mean values	45
Table 3. 3	Type of vehicle and passenger car equivalents	46
Table 3. 4	Results of flow rate analysis by lanes at the inbound	49
Table 3. 5	Results of flow rate analysis by lanes at the outbound	49
Table 3. 6	Results of speed analysis by lanes at the inbound	54
Table 3. 7	Results of speed analysis by lanes at the outbound	54
Table 3. 8	Results of density analysis by lanes at the inbound	59
Table 3. 9	Results of density analysis by lanes at the outbound	59
Table 4. 1	Speed-density and flow-speed function relationships	86
Table 4. 2	Re-specifications of speed-density and flow-speed function relationships ...	86
Table 4. 3	Speed elasticity of flow and congestion toll computational function for flow-speed models	87
Table 4. 4	Construction results of speed-density models	93
Table 4. 5	Results of parameters and maximum flow rate for each model ...	95

Table 4. 6	Speed-density and flow-speed function relationships by model construction result	96
Table 4. 7	Optimal speed-density and flow-speed function relationships ...	98
Table 4. 8	Estimation of overheads percentage for wage	103
Table 4. 9	Estimation of business travel time value using marginal wage rate method	103
Table 4.10	Estimation of business travel time value using marginal rate of substitution method	105
Table 4.11	Travel time value percentage of passenger car drivers underlying travel purposes(Abroad)	106
Table 4.12	Travel time value percentage of passenger car drivers underlying travel purposes(in Korea)	106
Table 4.13	Estimation of non-business travel time value	107
Table 4.14	Estimation of occupancy and travel purposes percentage	108
Table 4.15	Estimation of passenger car average travel time value	108
Table 4.16	Estimation result of congestion toll at the inbound and outbound ...	111
Table 4.17	Estimation result of congestion toll by speed interval at the inbound and outbound	112
Table 4.18	Inbound results by the CT payment method(Wed.)	114
Table 4.19	Outbound results by the CT payment method(Wed.)	115

List of Figures

Fig. 1. 1	Flowchart of study process	5
Fig. 2. 1	Speed-density curve of Greenshields model	16
Fig. 2. 2	Speed-density curves of Drew model	16
Fig. 2. 3	Speed-density curves of Pipes & Munjal model	17
Fig. 2. 4	Speed-density curve of Underwood model	18
Fig. 2. 5	Speed-density curve of Bell-shaped model	19
Fig. 2. 6	Speed-density curve of Ellis model	20
Fig. 2. 7	Speed-density curve of Edie(2-regime) model	21
Fig. 2. 8	Speed-density curve of modified Greenberg model	22
Fig. 3. 1	Geometry and equipments under the study	44
Fig. 3. 2	Flow rate distributions by lanes at the inbound	50
Fig. 3. 3	Flow rate distributions by lanes at the outbound	51
Fig. 3. 4	Speed distributions by lanes at the inbound	55
Fig. 3. 5	Speed distributions by lanes at the outbound	56
Fig. 3. 6	Density distributions by lanes at the inbound	60
Fig. 3. 7	Density distributions by lanes at the outbound	61
Fig. 3. 8	Flow-speed relationships at the inbound	63
Fig. 3. 9	Flow-speed relationships at the outbound	65
Fig. 3.10	Flow-density relationships at the inbound	68
Fig. 3.11	Flow-density relationships at the outbound	70
Fig. 3.12	Speed-density relationships at the inbound	73
Fig. 3.13	Speed-density relationships at the outbound	75
Fig. 3.14	3D-distribution at the inbound	78
Fig. 3.15	3D-distribution at the outbound	79
Fig. 4. 1	Estimation principle of congestion toll	80
Fig. 4. 2	Determination coefficients and standard errors of estimate	94
Fig. 4. 3	Flow-speed function relationships of Greenshields type models	97

Fig. 4. 4	Flow-speed function relationships of Underwood type models ...	97
Fig. 4. 5	Optimal flow-speed function relationships	98
Fig. 4. 6	Congestion tolls compared by MWRM and MRSM	111
Fig. 4. 7	Congestion tolls compared by speed interval	113

*Prediction and Evaluation of Congestion Toll According
to Variations in Traffic Flow Conditions*

- Based on the 1st Urban Freeway in Busan City -

Seung Gil, Kim

*Department of Civil and Environmental Engineering,
Graduate School, Korea Maritime University, Busan Korea*

Abstract

The population in the urban area has continuously increased with the economic growth in the country, and also the travel demand by automobiles has rapidly increased with the spread of the boundary and the increase of the population in the urban area since 1980's. Accordingly, the increase of the travel demand is in a situation causing the transportation problems, such as traffic congestion, traffic accident, and air pollution by automobiles, which was thought to be one of the severe problems out of the urban problems. Out of these transportation problems, traffic congestion occurring on the roadway is primarily the phenomenon occurring when the travel demand exceeds the roadway capacity, or the roadway capacity decreases below the travel demand. This causes the social loss of cost as a factor of the representative external diseconomy by the travel activity, except the difference in the level of congestion depending on the travel space and time period.

One of the solutions for relieving traffic congestion is continuously to

build the new roadway facilities or expand the existing roadway facilities for increasing the roadway capacity which could handle the increasing travel demand, but the limits are somewhat faced with in handling the travel demand only by the supply of the physical transportation facilities, because building the new roadway facilities or expanding the existing ones needs the huge invested funds. So the transportation demand management(TDM) program has began to gain power for controlling the travel demand as a proposal to relieve traffic congestion in a city or a specified area of the city since the late 1980's.

As one of the TDM programs, the congestion toll(CT) pricing program is not a program to easily get the agreement from the roadway users because it has a weakness to economically restrict the mobility of the roadway users. However, it is required to differently impose the congestion tolls on the roadway users by the congestion level of the roadway, because the CT pricing program is the alternative program which can get out of the external problem of transportation like an environmental problem and regulate the travel demand by the space and time for using the roadway efficiently.

Thus, on the premise of the introduction of the electronic toll collection system(ETCS) which is one of the intelligent transportation systems(ITS) the purpose in this study is to analyze the traffic characteristics and interrelationship between the traffic characteristics collected on the mainline sections of the inbound and outbound directions of the urban freeway under the study, derive the CT computational function with the speed elasticity and the traffic flow models before predicting and evaluating the congestion toll, and finally suggest the optimal CT predictive and evaluative model by comparing the congestion tolls predicted and evaluated.

From the analyses of the CT predictive and evaluative model, the congestion level was shown to be considerably different according to the spatial scope and the traffic flow models in the inbound and outbound directions. Also, the variable CT pricing program proved to be more efficient than the uniform CT pricing program by showing that the congestion toll was predicted to be low when speed was high, and predicted to be high when speed was low. Additionally, the congestion toll was shown to be extremely high when traffic flow arrived at the maximum flow condition, which was not a realistic congestion toll by imposing a high burden of cost on the roadway users. However, it showed that the total social cost was decreased by the increased cost of each trip even though the low congestion toll was imposed at the maximum flow condition (i.e., the oversaturated flow condition). So it was judged that the congestion toll must be priced depending on the speed intervals considering that the classified congestion tolls were not higher than the unclassified ones in order to minimize the repelling of the roadway users.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

지속적인 경제성장에 따른 국민의 소득수준 증대로 인한 자동차 이용의 급격한 증가로 교통혼잡, 교통사고, 대기오염 등의 다양한 교통문제가 도시문제 중에서 가장 심각한 문제 중 하나로 지적되고 있다.

우리나라의 경우 자동차등록대수가 2005년 기준 약 1,500만대로 교통수요가 급격하게 증가하였지만, 한정적 도로 공급으로 인하여 2005년 기준 전국의 교통혼잡비용은 약 23조 7천억원이며, 이는 GDP대비 약 2.94%로 교통혼잡으로 인한 사회적 손실비용이 국가경제에 지대한 영향을 미치고 있는 실정으로 부산광역시의 경우 교통혼잡비용은 2005년 기준 약 3조 4,799억원으로 1인당 교통혼잡비용은 약 96만원 정도로 나타났고, 차량 1대당 교통혼잡비용은 약 358만원 정도로 나타났다.

도로상에서 발생하는 교통혼잡은 교통수요가 도로용량을 초과하거나 도로용량이 교통수요이하로 감소하여 발생하는 현상으로 교통혼잡은 발생 장소와 시간을 예측할 수 있는 아침저녁의 출·퇴근시간대에 발생하는 반복(recurrent)혼잡과 교통사고와 같은 돌발상황, 운동경기, 대규모 집회, 유지보수 공사 등 특별행사 때 발생하는 비반복(non-recurrent)혼잡으로 구분할 수 있다.

교통혼잡은 장소와 시간대에 따른 혼잡의 정도에 차이가 있을 뿐, 교통활동에 따른 대표적인 외부불경제(external diseconomy) 요소로 교통혼잡을 완화하기 위한 해결방안 중 하나는 교통수요를 처리할 수 있는 도로를 지속적으로 신설하거나 확장하여 도로용량을 증대시키는 것이다. 하지만, 도로신설과 확장은 막대한 재원이 필요하고 계획에서 완공까지는 몇 년 또는 몇 십 년이 소요되기 때문에 물리적인 교통시설물의 공급으로 급증하는 교통수요에 대처하는 데에는 어느 정도 한계성에 직면하고 있다.

따라서 이에 대한 방안으로 1980년대 후반부터 도시 또는 일정지역에서 교통 혼잡 완화를 위하여 교통수요를 조절하는 교통수요관리(transportation demand management, TDM)방안이 대두되었다. 교통수요관리방안은 교통수요 조절을 통해서 통행자의 행태변화를 유도하여 통행속도증가, 통행비용감소, 대기오염감소 등의 사회적 손실비용을 감축하는 정책으로 교통시설의 개선이나 투자보다는 오히려 교통시설을 효율적으로 관리함으로서 교통수요를 조절하여 자원을 효율적으로 배분하고 투자효과를 극대화하는데 궁극적인 목적을 두고 있다.

교통수요관리방안중 하나인 혼잡통행료(congestion toll, CT) 부과정책은 자동차 이용자의 이동권을 경제적으로 제한하는 취약점이 있어서 도로이용자로부터 쉽게 동의를 받을 수 있는 정책은 아니지만 가용자원의 제약으로 교통시설의 공급도 여의치 않고, 환경문제와 같은 교통외적인 문제에서 벗어날 수 있는 대안으로 국내에서는 서울의 남산 1·3호 터널과 영국의 런던, 싱가포르, 동경 등에서 현재 시행되고 있다.

1.2 연구목적 및 필요성

혼잡통행료 부과정책은 도로이용자에게 통행요금 부과를 통해 도로이용자의 통행수요를 시·공간적으로 조절하여 기존 도로시설을 효율적으로 이용하기 위한 것으로 도로상의 시·공간적 혼잡정도에 따라 가변적으로 요금의 차등부과가 절실히 요구된다. 그러나 기존의 혼잡통행료 추정방법은 기·종점통행량(origin-destination trips)자료를 바탕으로 교통계획모형을 활용하여 혼잡통행료를 추정하므로 인해 기·종점통행량을 점(node)과 선(link)으로 구성된 가상의 도로망인 네트워크(network)에 배정하는 과정에서 개별 통행지구내 통행(intra-zonal trip)이 무시되어 혼잡통행료가 작게 산출되는 문제점을 내포하고 있으며, 하루 동안의 교통량을 기준으로 혼잡통행료를 산출하므로 획일적인 혼잡통행료만 산출되는 문제점을 가지고 있다.

따라서 이 연구에서는 지능형교통시스템(intelligent transportation system, ITS)인 통행료자동징수시스템(electronic toll collection system, ETCs) 도입을 전제로 실시간 관측 자료를 바탕으로 한 교통류모형과 차량당 통행시간가치를 이용하여 교통류의 혼잡정도에 따른 가변적인 혼잡통행료 추정 및 평가와 적정 혼잡통행료 설정을 위한 방법을 제시하고자 함에 목적이 있다.

1.3 연구내용 및 수행과정

1.3.1 연구내용

이 연구의 주요내용은 크게 i) 선행연구 고찰, ii) 자료수집 및 특성분석, iii) 혼잡통행료 모형구축 및 추정, iv) 결론 및 향후 연구과제로 구성되었으며, 각 단계에서 다루게 될 내용은 대략적으로 다음과 같다.

1) 선행연구 고찰

이 연구에서는 지능형교통시스템(ITS)인 통행료자동징수시스템(ETCS) 도입을 전제로 교통류모형과 차량당 통행시간가치를 이용하여 교통류의 상황변화에 따른 가변적인 혼잡통행료 추정 및 평가를 위해서 혼잡통행료에 대한 국내외 연구 및 시행사례 등에 대해서 선행연구를 고찰하였다. 또한 연구대상 도로에 대한 교통상황을 파악하기 위해서 교통류모형에 대한 선행연구와 차량당 통행시간가치 추정에 관한 이론적 연구 및 실증적 연구와 국내외 연구사례 등에 대해서도 선행연구를 고찰하였다.

2) 자료수집 및 특성분석

이 연구는 부산의 도심과 부도심을 연결하는 도시고속도로인 제1도시고속도로(번영로)를 연구대상지역으로 선정하여 진입램프상에서 과다한 진입차량으로 정체가 가중되는 도심방향(inbound)과 부도심방향(outbound)의 본선구간 2개

지점에 대해서 각 차로별로 검지기 NC-97를 설치하여 매 15분 간격으로 1일 24시간씩 일요일을 제외한 주중 6일간의 실시간 교통특성자료를 수집하여 정리하였고, 수집된 교통특성자료를 바탕으로 교통류율, 속도, 밀도 등의 개별 교통특성을 분석하였으며, 또한 교통특성 상호간의 관계도 분석하였다.

3) 혼잡통행료 모형구축 및 추정

이 연구에서는 혼잡통행료 추정에 앞서 선행 작업으로 속도탄력성과 교통류모형을 고려한 혼잡통행료 산정함수를 도출하였고, 그 다음으로 연구대상 도로에 대한 혼잡통행료 추정 및 평가를 위해서 혼잡통행료 추정 모형을 구축·검토하여 최적의 혼잡통행료 추정 모형을 선정한 후, 한계임금률법과 한계대체율법을 이용하여 추정된 차량당 통행시간가치와 최적의 혼잡통행료 추정 모형으로 선정된 혼잡통행료 산정함수를 적용하여 교통류의 혼잡정도에 따른 가변적인 혼잡통행료 추정 및 평가와 적정 혼잡통행료 설정을 위한 방법을 제시하였다.

4) 결론 및 향후 연구과제

결론에서는 이 연구의 종합적인 결과 및 의의를 정리하고, 향후 연구 과제를 제시하였다.

1.3.2 수행과정

이 연구는 교통류의 상황변화에 따른 가변적인 혼잡통행료 추정 및 평가에 관한 연구로 먼저 국내외 선행연구를 고찰하고, 연구대상 도로인 제1도시고속도로(번영로)내 도심방향과 부도심방향의 본선구간 상에서 수집된 교통특성자료를 이용하여 개별 교통특성 분석 및 교통특성간 상호관계를 분석하였으며, 혼잡통행료 추정에 앞서 속도탄력성과 교통류모형을 고려한 혼잡통행료 산정함수를 도출하였다. 그 다음으로 혼잡통행료 추정을 위한 모형을 구축·검토하여 최적의 혼잡통행료 추정 모형을 선정한 후, 차량당 통행시간가치와 최적의 혼

잡통행료 추정 모형으로 선정된 혼잡통행료 산정함수를 적용하여 혼잡통행료를 추정하고 평가하는 순서로 진행하였다.

이 연구의 전체적인 수행과정은 다음의 Fig. 1.1과 같다.

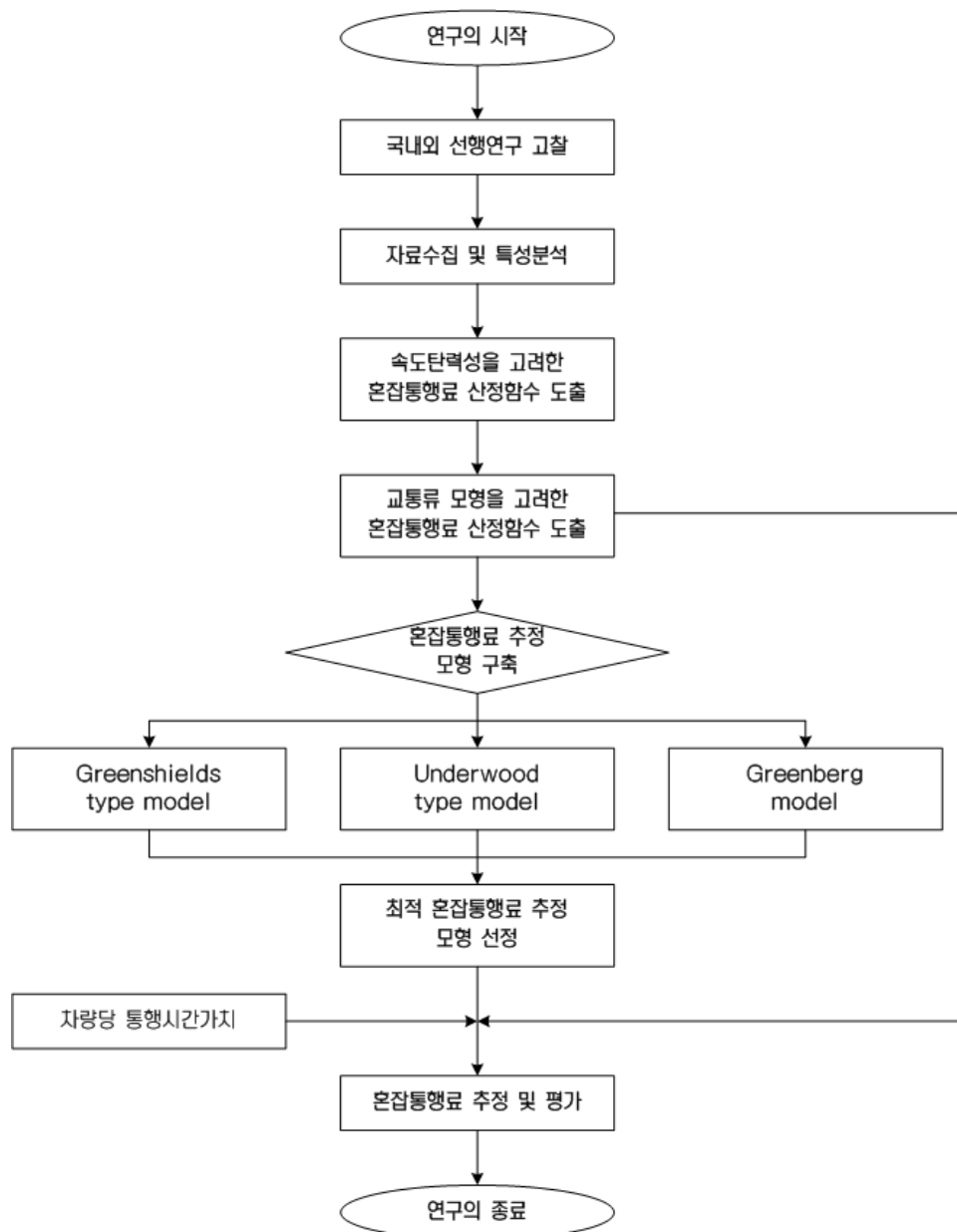


Fig. 1.1 Flowchart of study process

제 2 장 선행연구 고찰

2.1 혼잡통행료에 대한 고찰

혼잡통행료 이론은 경제학의 한계비용이론과 교통공학의 교통류이론이 접목되면서 발전된 것으로 도로상에 교통량이 일정수준이상 늘어나면 이는 시간지체를 초래하고 시간지체는 한계비용 등으로 비용화 될 수 있다는 데 근거한 이론이다(Holden, 1989). 한계비용은 도로상에 차량 한 대가 증가함에 따라 발생하는 전체비용의 증가분으로 전체비용이란 차량운행비용과 시간비용, 소음, 대기오염 등을 합한 일반화비용(*generalized cost*)을 말한다(Else, 1981; Small, 1992).

혼잡통행료 이론의 핵심은 혼잡한 도로의 이용자는 도로의 혼잡에 따른 손실을 스스로 입고 있으며 동시에 다른 도로의 이용자나 도로의 혼잡 때문에 도로의 이용을 포기한 사람들에게도 손실을 끼친다. 이러한 외부불경제에 따른 사회적 손실은 각 교통시설 이용자들에게 적절히 부담되고 있지 않아 교통량이 과잉이 되고, 혼잡이 심화된다는 것이다. 따라서 도로의 효율적인 이용을 달성하기 위해서는 정부가 차량에 대해 요금을 부과해야 한다고 한다(Wohl & Hendrickson, 1984).

혼잡통행료 이론은 주로 경제학자들에 의해 꾸준히 이론적 발전을 거듭해 왔으며, 다양한 연구 분야로 확장되고 있는 실정으로 국내외 대표적인 연구를 살펴보면 다음과 같다.

2.1.1 국내외 선행연구

1) 국외 연구

먼저 혼잡통행료 부과 필요성과 근거를 제시한 연구로는 Pigou(1920)와 Dupuit(1962)의 연구로 Pigou는 교통관련 외부비용의 내부화를 통하여 사회적 후생을 극대화하기 위한 혼잡통행료 수준은 한계비용에 근거해야 한다고 밝혔

고, 특히 서비스수준이 다른 도로에서는 통행요금의 차등화를 강조하였다. 또한 Dupuit는 교량을 대상으로 한 연구에서 교통량이 도로용량을 초과하면 혼잡으로 인한 사회적 손실이 발생하는데 이를 제거하기 위해서는 통행요금을 부과하여 사회적으로 적절한 수준의 교통량을 유지할 필요가 있다고 주장하였다.

Else(1981)와 Nash(1982)는 혼잡통행료 추정에 있어서 전통적인 혼잡통행료 추정방법을 바탕으로 교통량-비용 함수관계를 이용하여 최적 혼잡통행료 결정에 대한 이론적 방법을 제시하였고, 최적 혼잡통행료 결정에 대한 영향을 검증하였으며, 특히 Nash는 통행수요는 단위시간당 통과교통량이므로 혼잡요금도 시간에 따라 변해야 한다고 주장하였다.

Johansson(1992)은 Dupuit가 교량을 대상으로 한 연구에서 규명한 사회적으로 적절한 수준의 혼잡통행료를 유도하기 위한 기본적인 수학적 틀을 혼잡도로망의 경우로 확대하여 적용하였으며, 적절한 혼잡통행료 체계는 단순해야 하고, 이용자 편의를 고려해야 하며, 교통량에 직접 영향을 주어야 하고 혼잡통행료 부과수준이 수요에 다양하게 반응할 수 있어야 한다고 강조하였다.

Li(1999, 2002)는 싱가포르의 도심 진입 허가제도(area licensing scheme, ALS)가 시행되고 있는 지역을 대상으로 한 연구에서 실제 부과되고 있는 혼잡통행료와 관측교통량 자료를 이용하여 도출된 혼잡통행료 추정식을 바탕으로 추정된 혼잡통행료를 상호 비교·평가하여 실제 부과되고 있는 혼잡통행료의 적정성을 평가하였다. 또한 싱가포르의 고속도로(expressway)와 통행제한구역(restricted zone, RZ)을 대상으로 한 연구에서는 교통량-속도 관계식과 일반화비용을 이용하여 최적의 혼잡통행료 추정방법을 제안하여 거리기반의 혼잡통행료 추정방법을 제시하였다.

2) 국내 연구

김황배 등(1996)은 서울시 혼잡통행료제도 실시방안에 관한 연구에서 혼잡통행료 제도의 도입에 앞서 서울시 전역을 대상으로 혼잡지역을 분석하고 적정 혼잡통행료를 추정하였다. 그 결과 혼잡통행료 부과 대상지역을 개별 지역이

아닌 혼잡 지역군 단위로 설정하여 통행수요를 억제할 수 있는 한강 교량이나 시계 유출입 지점에 cordon을 설치하는 것이 적합하다고 주장하였고, 교통여건과 유출입 통행량의 특성을 고려하여 한강 교량을 통과하는 통일로~도심~강남대로를 연결하는 교통축을 대상으로 적정 혼잡통행료의 수준과 부과에 따른 효과를 분석한 결과 혼잡통행료 부과대상 차량은 자가용과 택시에 동시에 부과하는 것이 교통수요 감소나 사회적 후생측면에서 가장 적합하다고 제시하였다.

신기숙(1996)은 고속도로 혼잡통행료 산출에 관한 연구에서 기존 고속도로 통행요금 제도의 문제점을 보완하기 위해서 고속도로상의 교통수요를 조절하여 교통혼잡을 줄이고 효율적인 도로로 운영될 수 있도록 사회적 한계비용의 가격화 원리를 도입하여 혼잡통행료체계를 구축·제시하였고, 혼잡통행료체계는 실제 고속도로 상에서 수집한 자료를 바탕으로 구한 교통량-속도 관계식을 이용하여 우리나라 고속도로에 알맞은 도로용량함수인 차량운행비용 관계식과 시간가치비용 관계식을 유도한 후 혼잡을 고려한 모형 식을 제시하였다.

손봉수 등(2001)은 서울시 혼잡통행료 징수체계 보완 연구에서 시행 후 5년이 지난 남산 1·3호 터널구간에서 부과한 혼잡통행료의 징수대상과 징수시간대, 징수요금 및 방법이 교통여건에 부합되는지를 검토하고, 현재의 문제점을 보완하여 향후 서울시 전역으로 혼잡통행료 제도를 확대 시행할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다. 그 결과 혼잡통행료의 형평성문제와 관련해서는 한계효용이 낮은 즉 통행시간가치가 높은 승용차 운전자에게 통행료를 부과하여 얻은 혼잡통행료 수입금을 도로운영개선, 교통정보시스템 구축, 대중교통체계 개선 등에 투자함으로써 한계효용이 높은 대중교통 이용자의 통행시간을 단축시켜야 소득재분배의 효과가 있다고 강조하였다.

김태승 등(2004)은 혼잡통행료제도 확대시행의 효과분석에 관한 연구에서 서울시 교통현황에 대한 종합적 검토를 바탕으로 서울 도심 및 부도심지역의 교통혼잡 완화를 위한 혼잡통행료 제도의 시행효과를 BRT(bus rapid transit)와의 정책결합을 중심으로 분석하였다. 그 결과 혼잡통행료 제도 시행에 대한 사회적 수용성은 매우 낮은 것으로 나타났고, BRT와의 결합시행을 통해 사회적 수

용성을 높일 수는 있으나 제도 시행을 위해서는 교통혼잡 완화효과에 대한 지속적인 홍보노력이 필요하다고 강조하였다. 또한, 교통혼잡 완화효과를 고려하면, 혼잡통행료 단독 시행보다 혼잡통행료+BRT가 보다 나은 정책수단이나 형평성을 고려할 경우 어떤 경우든 소득 역진적이라는 점을 고려하여 저소득층에 대한 지원책이 마련되어야 한다고 강조하였다.

정일호 등(2006)은 효율적인 교통혼잡 통행료정책 도입방안 연구에서 혼잡통행료 정책과 관련하여 통행료 징수지역, 징수방식, 징수요금, 징수지점 등 다양한 정책시행방안을 마련하여 정책의 효율성 및 소득 계층간 또는 지역간 형평성을 평가하였고, 정책의 수용성 제고를 위한 법적·제도적 기반의 정비방안을 제시하였다.

강경우 등(2006)은 강변북로를 대상으로 한 혼잡통행료 추정연구에서 전통적인 경제학적 개념의 수요함수와 비용함수간의 관계로부터 혼잡통행료를 추정할 때 어려움을 극복하고자 실제 적용 가능한 혼잡통행료를 추정하기 위해서 도로상의 교통량 자료를 바탕으로 속도-밀도 관계식을 이용한 공학적 방법론을 적용하여 도로의 소통상황에 따른 적정 혼잡통행료를 추정하여 제시하였다.

2.1.2 국내외 시행사례

혼잡통행료 정책을 도입하여 시행하고 있는 국내외 시행사례를 시행방식 측면, 사회적 수용성 측면, 징수금 활용 측면으로 나누어 살펴보면 Table 2.1과 같다.

1) 시행방식 측면

첫째, 징수지역 또는 지점을 설정하는데 있어 런던, 싱가포르, 동경의 경우에는 개념의 특정지역을 선정하여 그 지역으로 진출입하는 차량에 대해서 혼잡통행료를 징수하는 cordon방식을 채택하고 있고, 서울의 경우는 지점개념의 특정지점을 선정하여 그 지점을 통과하는 차량에 대해서 혼잡통행료를 징수하는 corridor방식을 채택하고 있으며, 캘리포니아의 경우 차선개념의 특정차선을 선

정하여 그 차선을 통행하는 차량에 대해서 혼잡통행료를 징수하는 lane방식을 채택하고 있다. 특정지역을 대상으로 하는 cordon방식은 우회도로를 근본적으로 차단하여 혼잡통행료 시행구역 내 교통혼잡 완화효과가 크고, 공간적으로 징수구역이 명확하여 인식도가 높은 장점이 있다. 그러나, 혼잡통행료 시행구역 주변에 거주민이 많을 경우에는 교통혼잡 완화효과가 저감되고, 시행구역이 크지 않을 경우 교통개선효과가 국지적이며, 우회도로가 없을 때 통과통행이 과도한 경제적 부담이 있다. 반면에 교통축을 대상으로 하는 corridor방식은 교통축이 혼잡통행료 징수요건에 해당할 경우 징수지점을 자유롭게 선정할 수 있고, BRT가 시행될 경우 차량우회의 문제를 최소화 할 수 있는 장점이 있지만, 일부 축에서만 시행될 때 우회통행으로 인해 혼잡감소효과가 미흡할 수 있는 문제점이 있다.

둘째, 징수방식에 있어 런던의 경우는 징수지역 내에 편의점, 자동납부기계 등의 다양한 징수수단을 통해 통행료를 징수하고 있고, 싱가포르, 동경, 캘리포니아의 경우는 징수지역을 진입하는 도로에 전자식시스템을 도입하여 통행료를 자동으로 징수하는 방식을 채택하고 있어 혼잡통행료 징수에 의해 교통흐름이 방해 받지 않도록 하고 있지만, 서울에서는 인력에 의한 수동징수로 요금징수소에서 교통정체로 인한 교통흐름이 방해를 받고 있다.

셋째, 통행료 수준에 있어 런던, 싱가포르, 동경, 캘리포니아의 경우는 혼잡통행료 징수를 통해 달성하고자 하는 통행속도 향상, 환경오염물질 감소 등과 같은 다양한 목표를 설정하여 그 효과를 비교·분석한 후 목표를 달성하기 위해 필요한 혼잡완화 효과가 있는 수준에서 통행료 수준을 결정하였다. 결국, 네 도시 모두 통행료 수준에 따른 영향정도를 사전에 분석하고 이를 고려하여 통행료 수준을 결정하고 있음을 알 수 있다. 혼잡통행요금에 있어 런던과 서울의 경우는 정액요금제 방식을 채택하고 있고, 싱가포르, 동경, 캘리포니아는 수시로 요금이 변동되는 차등요금제를 채택하고 있다.

넷째, 징수시간과 징수대상은 런던, 싱가포르, 동경, 서울 모두 탄력적으로 운영되고 있는 반면에 캘리포니아의 경우 징수시간을 전일제로 운영하고 있다.

2) 사회적 수용성 측면

혼잡통행료 정책은 혼잡통행료 부과에 이론적 배경에도 불구하고 제도 도입에 대한 사회적 반대로 발생할 수 있는 사회적 부담이 매우 클 수 있으므로 사회적 수용성을 확보하기 위한 다양한 노력이 필요하다. 따라서 런던, 싱가포르, 동경 등에서 사회적 수용성을 확보하기 위한 제고방안을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 혼잡통행료 제도의 효과를 지속적으로 홍보하여 반대집단을 설득하고자 하였고, 홍보책자, TV, 라디오 등 다양한 홍보매체를 활용하여 혼잡통행료 시행효과를 시민에게 널리 알렸으며, 다양한 사회계층의 의견을 수렴하여 반영하였다. 런던의 경우 시민의 반대를 최소화하기 위한 징수금 활용방안 제시 등 효율적인 정책을 개발·적용하여 반대집단을 설득하는데 성공하였다.

둘째, 혼잡통행료 제도를 계획하는 단계에서부터 제도를 보조하는 버스전용차로, 신호시간 개선, 회전금지 등 다양한 교통관리계획을 함께 검토하였고, 이러한 보조적인 계획의 병행을 통해 혼잡통행료 징수에 따른 부정적 영향을 우려하는 집단을 설득하였다.

셋째, 정부가 제시하는 교통혼잡 완화라는 정책목표의 일관성을 유지하여 혼잡통행료 제도뿐만 아니라 도로망 확충과 대중교통의 노선과 서비스 개발, 교통수단간의 통합과 조화를 위해 다양하고 장기적인 계획을 수립하고, 혼잡통행료 제도 역시 교통혼잡 완화라는 큰 목표를 위한 하나의 정책이라는 점을 일반 시민에게 지속적으로 이해시켰다.

넷째, 혼잡통행료 제도와 관련한 다양한 기술 및 서비스 측면을 고려하여 혼잡통행료 징수로 인한 시민불편을 최소화하기 위해 노력하였고, 통행료 징수시스템의 자동화와 첨단화를 통해 신뢰성을 확보하고 있다.

다섯째, 통행료 수준, 징수대상 및 징수시간대를 탄력적으로 운영하여 특정집단 또는 개인이 불이익을 당하는 경우를 최소화 하여 혼잡통행료 징수효과가 특정한 통행 출발지 또는 목적지를 가진 집단이나 특정 소득계층에게만 적게

나타나는 경우를 최소화하여 형평성을 확보하고 있다.

3) 징수금 활용 측면

혼잡통행료 징수금 활용측면을 살펴보면 런던의 경우는 혼잡통행료 징수금을 대중교통 개선과 도로안전 및 보행자 안전 등을 위해 활용되고 있는 것으로 나타났다, 동경의 경우는 환경오염저감 및 기타 교통수요관리 정책을 위한 활용을 계획하고 있으며, 서울은 교통시설확충 위해 활용되고 있는 것으로 나타났다.

Table 2.1 Congestion toll implementation instance

Country		London	Singapore	Tokyo	Seoul	California
시행 내용	징수 지역	· cordon방식	· cordon방식	· cordon방식	· corridor방식	· lane방식
	징수 방법	· 선납/후납 혼합 · 편의점, 이체 등 다양한 방식	· 자동징수 (전자시스템)	· 자동징수 (전자시스템)	· 수동징수(인력)	· 자동징수 (전자시스템)
	징수 요금	· 정액요금 · 8£/대	· 수시변동 · S\$0.50~3.50	· 수시변동 요금으 로 계획중	· 정액요금 · 2000원/대	· 수시변동 · \$1.20~10.0
	징수 시간	· 주중 07:00~08:30	· 제한구역(평일) 07:30~19:00 · 고속도로(평일) 07:30~09:30	· 계획중	· 평 일 07:00~21:00 · 토요일 07:00~15:30	· 평일 00:00~24:00 · 토요일 일요일 00:00~24:00
	징수 대상	· 특정차량을 제외 한 전차량	· 6개 차종(승용차, 오토바이, 경량화 물차/소형버스, 대형화물차/대형 버스, 택시)별로 각각 다르게 부 과	· 특정차량을 제외 한 전차량	· 특정차량을 제외 한 전차량	· 특정차량을 제외 한 전차량
시행 효과	교통량	· 진입 14% 감소 · 진출 18% 감소	· 13% 감소	· 크게 감소	· 10%감소에서 최 근 다시 증가	· 나홀로 차량 감 소
	혼 잡	· 시간 44% 감소	· 속도 20% 향상	· 속도 0.9~2.0 kph 감소	· 속도 135% 향상	· 속도 250% 향상
	수 단	· 버스승객 하루 7 만명 증가 · 승용차 포기 수 요 60% 대중교 통 전환	· 대중교통으로 전 환	· 철도 및 노선버 스 이용자 증가	—	—
	기 타	· 오염물질 30% 감소	· 출발시간 변경	· 오염물질 300~ 400톤/년 감소	· 카풀차량 78% 증가	· 카풀차량 증가
사회적수용성 제고방안		· 지속적인 홍보 · 보조계획 병행	· 정책 일관성유지 · 시민불편 최소화	· 지속적인 홍보	—	· 지속적인 홍보
징수금활용		· 대중교통 및 보 행자 안전	· 교통시설 확충	· 환경저감	· 교통시설 확충	· 교통시설 개선 · 교통안전

2.2 교통류모형에 대한 고찰

교통류는 고속도로의 교통흐름과 같은 연속 교통류와 신호교차로의 교통흐름과 같은 단속 교통류로 구분되며, 연속 교통류의 교통특성을 나타내는 대표적인 척도는 교통량(volume), 속도(speed), 밀도(density)로 이들 변수간의 상호관계식을 나타낸 것을 교통류모형이라 한다.

교통류모형의 교통량, 속도, 밀도간 상호 관계식은 다음의 식(2.2.1)과 같다.

$$q = u \cdot k \quad (2.2.1)$$

여기서,

q : 평균교통류율(veh/h)

u : 공간평균속도(km/h)

k : 평균밀도(veh/km)

이와 같은 변수와 관련된 다른 부호의 정의는 다음과 같다.

u_f : 자유속도(km/h)

k_j : 혼잡밀도(veh/km)

q_m : 최대 교통류율(veh/h), 용량

u_m : 임계속도(km/h), 최대 교통류율 일 때의 속도

k_m : 임계밀도(veh/km), 최대 교통류율 일 때의 밀도

2.2.1 속도-밀도 모형

일반적으로 도로상을 주행하는 차량대수가 많아지게 되면 밀도가 증가하여 운전자가 속도를 줄여야 하는 것처럼 속도와 밀도사이에는 밀접한 상호작용이 존재한다.

따라서 속도와 밀도간의 관계에 대한 형태를 규명하고자 지금까지 다양한 연구가 수행되어 왔으며, 이에 대한 연구로는 단일구간모형(single regime model)과 다중구간모형(multi regime model)에 대한 연구가 있다.

단일구간모형으로는 Greenshields, Drew, Pipes & Munjal 모형 등과 같은 Greenshields형 모형이 있고, Underwood, Bell-shaped, Drake et al. 모형 등과 같은 Underwood형 모형이 있으며, 그 외 Greenberg 모형 등이 있다.

다중구간모형으로는 2중구간(2-regime) 선형모형과 3중구간(3-regime) 선형모형 등과 같은 Ellis 모형과 Edie 모형, 수정된 Greenberg 모형 등이 있다.

1) 단일구간모형

(1) Greenshields형 모형

Greenshields형 모형은 β 값의 변화에 따라 Greenshields, Drew, Pipes & Munjal 모형 등과 같은 다양한 형태로 모형 유도가 가능한 모형으로 속도와 밀도관계를 다음의 식(2.2.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u = u_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j} \right)^\beta \right] \quad (2.2.2)$$

여기서,

u : 공간평균속도(km/h)

u_f : 자유속도(km/h)

k : 평균밀도(veh/km)

k_j : 혼잡밀도(veh/km)

β : 실수(real number), ($\beta > 0$)

Greenshields(1935) 모형은 $\beta = 1$ 인 경우로 속도와 밀도관계를 다음의 Fig. 2.1³⁰⁾과 같이 직선형태로 제시한 모형으로 식의 형태가 간단하다는 면에서 적용이 용이하지만, 밀도가 아주 높거나 낮은 경우 실제 도로상에서 관측된 자료와

일치하지 않으므로 단순히 직선 형태로 처리하기에는 어려운 문제점이 있다.

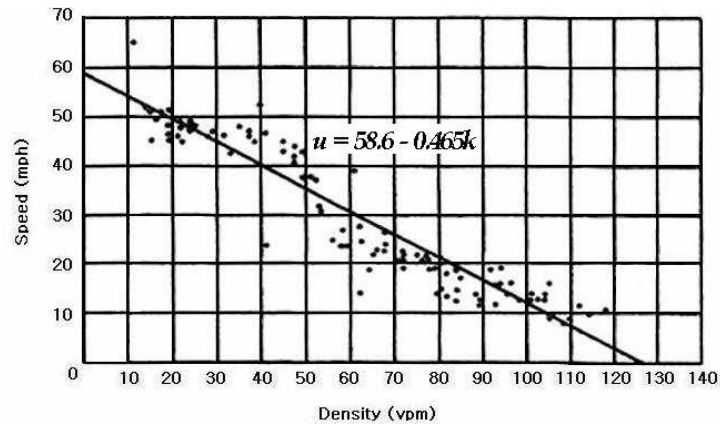


Fig. 2.1 Speed-density curve of Greenshields model

Drew(1965) 모형은 $\beta = (n+1)/2$ 인 경우로 속도와 밀도관계를 다음의 Fig. 2.2³¹⁾와 같이 여러 부분으로 나누어 모형을 설정하는 것이 전체를 하나의 모형으로 설명하는 것보다 정확하다는 사실을 착안하여 여러 모형에 적용시킬 수 있는 모형으로 $n=1$ 일 때는 Greenshields 모형과 동일한 형태를 갖게 되고, $n=0$ 일 때는 포물선 형태를 갖게 된다.

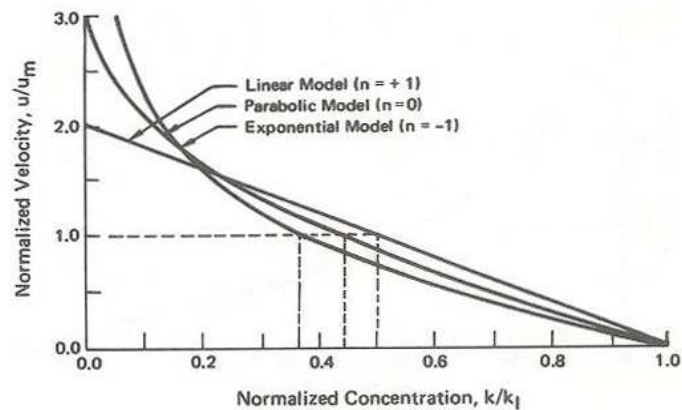


Fig. 2.2 Speed-density curves of Drew model

Pipes & Munjal(1971) 모형은 $\beta = n$ 인 경우로 속도와 밀도관계를 다음의 Fig. 2.3⁵⁴⁾과 같이 더욱 확장된 일반화 모형으로 제시한 것으로 $n = 1$ 일 때는 Greenshields 모형과 동일한 형태를 갖게 된다.

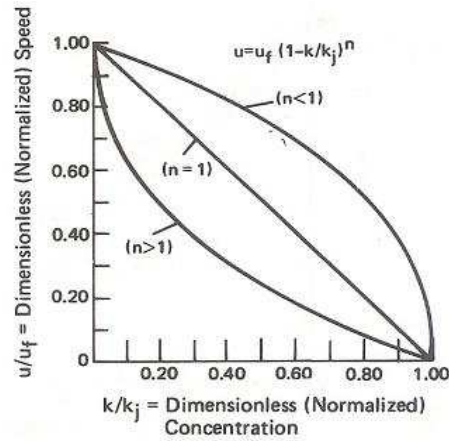


Fig. 2.3 Speed-density curves of Pipes & Munjal model

(2) Underwood형 모형

Underwood형 모형은 δ 값의 변화에 따라 Underwood, Bell-shaped, Drake et al. 모형 등과 같은 다양한 형태로 모형 유도가 가능한 모형으로 속도와 밀도관계를 다음의 식(2.2.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = u_f \cdot \exp \left[-\frac{1}{\delta} \cdot \left(\frac{k}{k_m} \right)^\delta \right] \quad (2.2.3)$$

여기서,

u : 공간평균속도(km/h)

u_f : 자유속도(km/h)

k : 평균밀도(veh/km)

k_m : 임계밀도(veh/km)

δ : 실수(real number), ($\delta > 0$)

Underwood(1961) 모형은 $\delta = 1$ 인 경우로 속도와 밀도관계를 다음의 Fig. 2.4³⁰⁾와 같이 지수형태로 제시한 모형으로 일반적으로 밀도가 낮은 부분에서는 속도와 밀도관계를 정확히 산출할 수 있으나, 밀도가 높은 부분에서는 속도와 밀도관계를 정확히 산출할 수 없는 문제점이 있다.

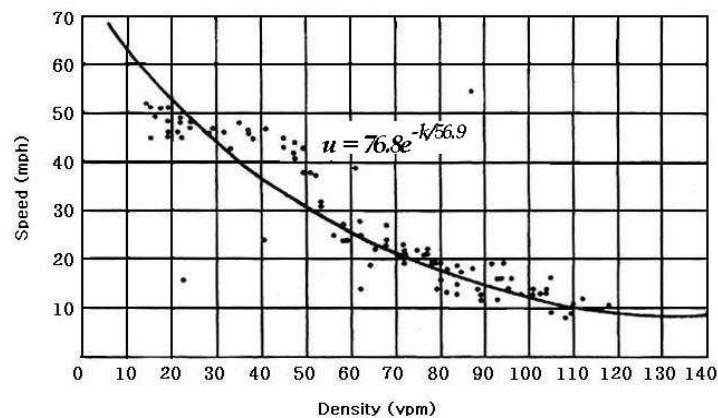


Fig. 2.4 Speed-density curve of Underwood model

Bell-shaped 모형은 $\delta = 2$ 인 종형모형으로 다음의 Fig. 2.5³⁰⁾와 같이 Underwood가 제시한 모형과 비슷한 모형으로 Northwestern 대학의 연구자들에 의해서 제시되었으며, 종형모형의 단점은 Underwood 모형과 같이 밀도가 높은 경우 속도를 정확히 산출할 수 없는 문제점이 있다.

Drake et al.(1967) 모형은 $\delta = n$ 인 경우로 속도와 밀도관계를 더욱 확장된 일반화 모형으로 제시한 것으로 $n=1$ 일 때는 Underwood 모형과 동일한 형태를 갖게 되며, $n=2$ 일 때는 Bell-shaped 모형을 갖게 된다.

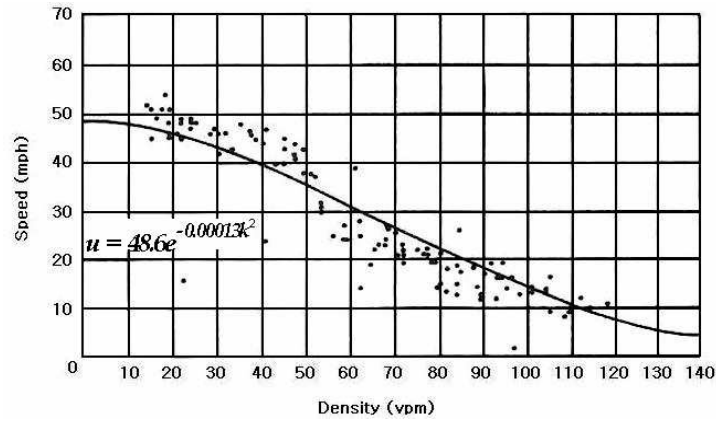


Fig. 2.5 Speed-density curve of Bell-shaped model

(3) Greenberg 모형

Greenberg(1959) 모형은 속도와 밀도관계를 로그형태로 제시한 모형으로 Underwood 모형과는 반대로 밀도가 높은 부분에서는 속도와 밀도관계를 정확히 산출할 수 있으나, 밀도가 낮은 부분에서는 속도와 밀도관계를 정확히 산출할 수 없는 문제점이 있다.

Greenberg 모형의 속도와 밀도관계 식은 다음의 식(2.2.4)와 같다.

$$u = u_m \cdot \ln\left(\frac{k_j}{k}\right) \quad (2.2.4)$$

여기서,

u : 공간평균속도(km/h)

k : 평균밀도(veh/km)

k_j : 혼잡밀도(veh/km)

u_m : 임계속도(km/h)

2) 다중구간모형

(1) Ellis 모형

Ellis(1964)는 관측 자료를 영역 구간으로 구분하여 2중구간과 3중구간 선형모형을 다음의 Fig. 2.6³⁰⁾과 같이 제시하였고, 특히 3중구간 선형모형에서는 자유 교통류(free flow) 영역, 방해 교통류(impeded flow) 영역 및 정체 교통류(congested flow) 영역으로 구별하였다.

구간별 선형모형의 가장 큰 특징은 비선형 관계를 간단한 선형관계로 나타낼 수 있다는 장점이 있지만, 선형영역 간 경계의 불연속성이 존재하여 용량 확인 과정이 복잡하고 여러 개의 용량 값이 발생할 수 있는 단점이 있다.

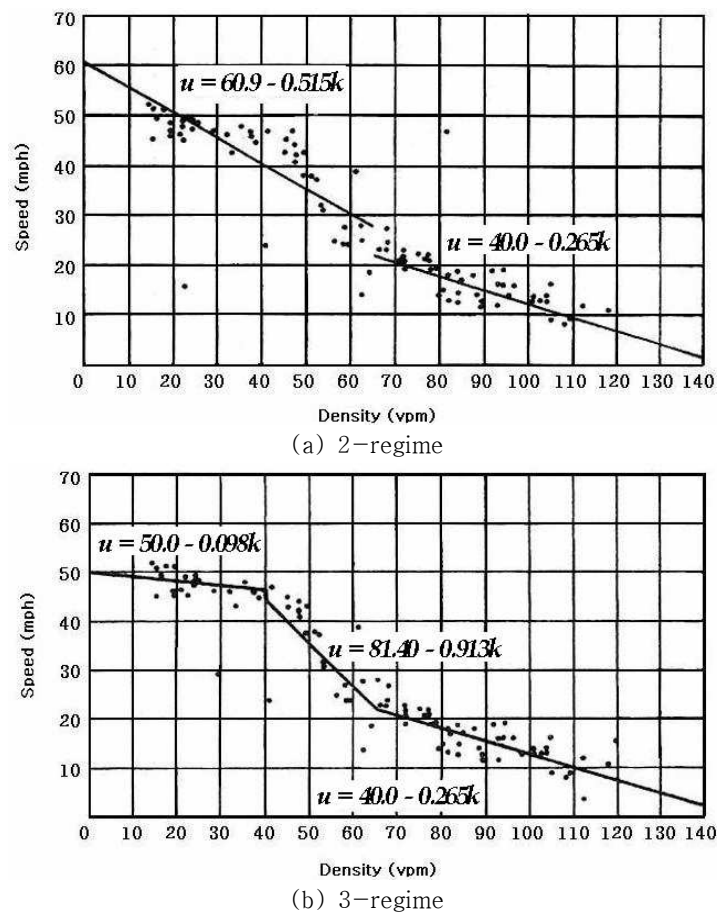


Fig. 2.6 Speed-density curve of Ellis model

(2) Edie 모형

Edie(1961) 모형은 밀도가 높고 낮은 교통류 상태를 동시에 표현하기 위하여 Underwood 모형과 Greenberg 모형을 통합하여 속도와 밀도관계를 다음의 Fig. 2.7³⁰⁾과 같이 현실적으로 나타내고자 하였으며, 속도와 밀도관계를 다음과 같이 제시하였다.

$$\text{밀도 } k \text{가 낮을 때, } u = u_f \cdot \exp\left(-\frac{k}{k_m}\right) \quad (2.2.5)$$

$$\text{밀도 } k \text{가 높을 때, } u = u_m \cdot \ln\left(\frac{k_j}{k}\right) \quad (2.2.6)$$

여기서,

u : 공간평균속도(km/h)

k : 평균밀도(veh/km)

k_j : 혼잡밀도(veh/km)

k_m : 임계밀도(veh/km)

u_m : 임계속도(km/h)

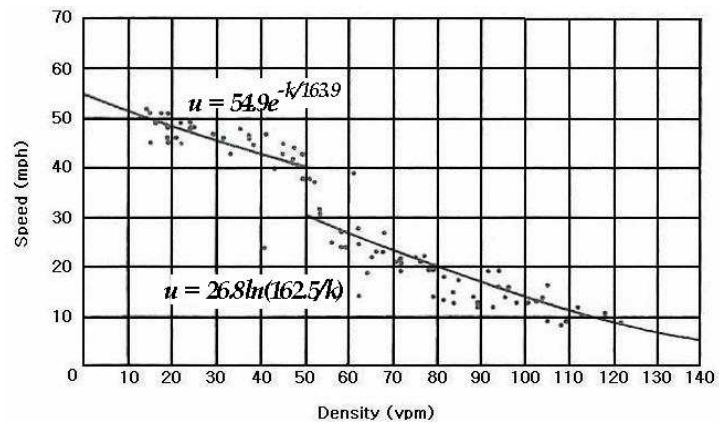


Fig. 2.7 Speed-density curve of Edie(2-regime) model

(3) 수정된 Greenberg 모형

수정된 Greenberg 모형은 교통류 영역을 2중 구간으로 구분하여 자유 교통류 영역은 직선모형을 제시하였고, 자유 교통류 이외의 영역에 대해서는 로그모형을 제시한 것으로 다음의 Fig. 2.8³⁰⁾과 같다.

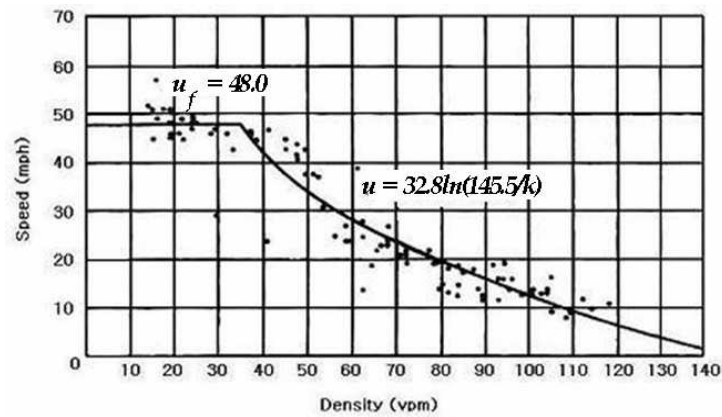


Fig. 2.8 Speed-density curve of modified Greenberg model

Greenshields형 모형, Underwood형 모형, Greenberg 모형과 같은 단일구간 모형과 Ellis 모형, Edie 모형, 수정된 Greenberg 모형과 같은 다중구간모형에 대한 구체적인 특징들을 살펴보면 다음의 Table 2.2와 같다.

Table 2.2 Characteristics of single regime models and multi regime models

Model			Characteristic
Single regime models	Greenshields type model	Greenshields model, $\beta = 1.0$	<ul style="list-style-type: none"> · 식의 형태가 간단하고 적용이 용이함 · 밀도가 아주 높거나 낮은 경우 실제 도로상에서 관측된 자료와 일치하지 않음
		Drew model, $\beta = (n+1)/2$	<ul style="list-style-type: none"> · 하나의 모형으로 다양한 모형이 구축 가능함 · 실제 도로상에서 관측된 자료와 비교적 일치함
		Pipes & Munjal model, $\beta = n$	<ul style="list-style-type: none"> · 하나의 모형으로 다양한 모형이 구축 가능함 · 실제 도로상에서 관측된 자료와 비교적 일치함
	Underwood type model	Underwood model, $\delta = 1.0$	<ul style="list-style-type: none"> · 밀도가 낮은 부분에서는 속도와 밀도관계를 정확하게 산출할 수 있으나, 밀도가 높은 부분에서는 속도와 밀도관계를 정확하게 산출할 수 없음
		Bell-shaped model, $\delta = 2.0$	<ul style="list-style-type: none"> · Northwestern 대학의 연구자들이 제시한 모형 · Underwood 모형과 같이 밀도가 높을 경우 속도를 정확하게 산출할 수 없음
		Drake et al. model, $\delta = n$	<ul style="list-style-type: none"> · 하나의 모형으로 다양한 모형이 구축 가능함 · 실제 도로상에서 관측된 자료와 비교적 일치함
	Greenberg model		<ul style="list-style-type: none"> · 밀도가 높은 부분에서는 속도와 밀도관계를 정확하게 산출할 수 있으나, 밀도가 낮은 부분에서는 속도와 밀도관계를 정확하게 산출할 수 없음
Multi regime models	Ellis model (Two regime linear model, Three regime linear model)		<ul style="list-style-type: none"> · 비선형 관계를 간단한 선형관계로 나타낼 수 있음 · 선형영역 간 경계의 불연속성이 존재하여 여러 개의 용량 값이 발생함
	Edie model (Two regime model)		<ul style="list-style-type: none"> · Underwood 모형과 Greenberg 모형을 통합하여 제시한 모형 · 밀도가 높고 낮은 교통류 상태를 동시에 나타낼 수 있음
	Modified Greenberg model (Two regime model)		<ul style="list-style-type: none"> · 교통류 상태를 2중 구간으로 구분하여 자유 교통류 영역은 직선모형, 자유 교통류 영역 이외 영역은 로그모형을 제시한 모형

2.2.2. 교통량-밀도 모형

1) Greenshields형 모형

Greenshields형 모형의 교통량과 밀도관계 식은 Greenshields형 속도와 밀도관계 식으로부터 직접 얻을 수 있다. 교통류모형 식(2.2.1)에 Greenshields형 속도와 밀도관계 식(2.2.2)을 대입하면, 다음의 식(2.2.7)과 같은 교통량과 밀도관계식을 구할 수 있다.

$$q = u \cdot k = u_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j} \right)^\beta \right] \cdot k = u_f \left[k - \left(\frac{k^{\beta+1}}{k_j^\beta} \right) \right] \quad (2.2.7)$$

상기의 식(2.2.7)에서 최대 교통류율, 즉 용량을 갖게 되는 밀도를 구하기 위해서는 다음과 같은 절차를 거치게 된다.

$$\frac{dq}{dk} = u_f \left[1 - \frac{\beta + 1 \cdot k_m^\beta}{k_j^\beta} \right] = 0 \quad (2.2.8)$$

$$u_f = 0 \text{이 아니므로 } \left[1 - \frac{\beta + 1 \cdot k_m^\beta}{k_j^\beta} \right] = 0 \text{이므로 따라서 } k_m = \frac{k_j}{(\beta + 1)^{1/\beta}} \text{가 된다.}$$

이 점에서의 교통류율이 최대가 되기 때문에 일반적으로 이 점에서의 밀도를 임계밀도(k_m), 속도를 임계속도(u_m)라고 하며 다음과 같이 표시된다.

$$u_m = u_f \left[1 - \frac{k_j^\beta / (\beta + 1)}{k_j^\beta} \right] = \left(\frac{\beta}{\beta + 1} \right) u_f \quad (2.2.9)$$

따라서 교통용량(q_m)은 다음과 같다.

$$q_m = u_m \cdot k_m = \left(\frac{\beta}{\beta+1} \right) u_f \cdot \frac{k_j}{(\beta+1)^{1/\beta}} \quad (2.2.10)$$

2) Underwood형 모형

Underwood형 모형의 교통량과 밀도관계 식은 Underwood형 속도와 밀도관계 식으로부터 직접 얻을 수 있다. 교통류모형 식(2.2.1)에 Underwood형 속도와 밀도관계 식(2.2.3)을 대입하면, 다음의 식(2.2.11)과 같은 교통량과 밀도관계 식을 구할 수 있다.

$$q = u \cdot k = u_f \cdot \exp \left[-\frac{1}{\delta} \cdot \left(\frac{k}{k_m} \right)^\delta \right] \cdot k \quad (2.2.11)$$

상기의 식(2.2.11)을 미분하고 $k = k_m$ 을 대입하면 다음과 같다.

$$u_m = \frac{u_f}{\exp(1/\delta)} \quad (2.2.12)$$

따라서 교통용량(q_m)은 다음과 같다.

$$q_m = u_m \cdot k_m = \frac{u_f \cdot k_m}{\exp(1/\delta)} \quad (2.2.13)$$

이 경우에는 임계밀도(k_m)이 사전에 결정되어야 하며, 이에 따라 다른 변수들이 결정된다.

3) Greenberg 모형

Greenberg 모형의 교통량과 밀도관계 식은 Greenberg 속도와 밀도관계 식으로부터 직접 얻을 수 있다. 교통류모형 식(2.2.1)에 Greenberg 속도와 밀도관계 식(2.2.4)을 대입하면, 다음의 식(2.2.14)와 같은 교통량과 밀도관계 식을 구할 수 있다.

$$q = u \cdot k = u_m \cdot \ln\left(\frac{k_j}{k}\right) \cdot k \quad (2.2.14)$$

상기의 식(2.2.14)을 밀도에 대해 미분하고 $k = k_m$ 을 대입하면 다음과 같다.

$$k_m = \frac{k_j}{\exp(1)} \quad (2.2.15)$$

따라서 교통용량(q_m)은 다음과 같다.

$$q_m = u_m \cdot k_m = \frac{u_m \cdot k_j}{\exp(1)} \quad (2.2.16)$$

이 경우에는 임계속도(u_m)이 사전에 결정되어야 하며, 임계속도(u_m)에 따라 다른 변수들이 결정된다.

2.2.3 교통량-속도 모형

1) Greenshields형 모형

Greenshields형 모형의 교통량과 속도관계 식은 교통류모형 식(2.2.1)과 Greenshields형 속도와 밀도관계 식(2.2.2)을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

Greenshields형 속도와 밀도관계 식(2.2.2)을 변형시키면 다음과 같다.

$$u - u_f = -u_f \left(\frac{k}{k_j} \right)^\beta \quad (2.2.17)$$

따라서, 밀도(k)는 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$k = k_j \left(1 - \frac{u}{u_f} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.2.18)$$

상기의 식(2.2.18)을 교통류모형 식(2.2.1)에 대입하면, 다음의 식(2.2.19)와 같은 교통량과 속도관계 식을 구할 수 있다.

$$q = u \cdot k = u \cdot k_j \left(1 - \frac{u}{u_f} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.2.19)$$

2) Underwood형 모형

Underwood형 모형의 교통량과 속도관계 식은 교통류모형 식(2.2.1)과 Underwood형 속도와 밀도관계 식(2.2.3)을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

Underwood형 속도와 밀도관계 식(2.2.3)을 변형시키면 다음과 같다.

$$\ln\left(\frac{u}{u_f}\right) = -\frac{1}{\delta} \cdot \left(\frac{k}{k_m}\right)^\delta \quad (2.2.20)$$

따라서, 밀도(k)는 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$k = k_m \left(\delta \cdot \ln \frac{u_f}{u} \right)^{\frac{1}{\delta}} \quad (2.2.21)$$

상기의 식(2.2.21)을 교통류모형 식(2.2.1)에 대입하면, 다음의 식(2.2.22)와 같은 교통량과 속도관계 식을 구할 수 있다.

$$q = u \cdot k = u \cdot k_m \left(\delta \cdot \ln \frac{u_f}{u} \right)^{\frac{1}{\delta}} \quad (2.2.22)$$

3) Greenberg 모형

Greenberg 모형의 교통량과 속도관계 식은 교통류모형 식(2.2.1)과 Greenberg 속도와 밀도관계 식(2.2.4)을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

Greenberg 속도와 밀도관계 식(2.2.4)을 변형시키면 다음과 같다.

$$\exp\left(\frac{u}{u_m}\right) = \frac{k_j}{k} \quad (2.2.23)$$

따라서, 밀도(k)는 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$k = k_j \cdot \exp\left(-\frac{u}{u_m}\right) \quad (2.2.24)$$

상기의 식(2.2.24)을 교통류모형 식(2.2.1)에 대입하면, 다음의 식(2.2.25)와 같은
교통량과 속도관계 식을 구할 수 있다.

$$q = u \cdot k = u \cdot k_j \cdot \exp\left(-\frac{u}{u_m}\right) \quad (2.2.25)$$

2.3 통행시간가치에 대한 고찰

통행시간가치란 통행자가 1단위의 통행시간을 단축하기 위하여 기꺼이 지불할 만한 크기의 금전적 가치를 의미한다(Davis & Rogers, 1973). 모든 사람들에게 시간은 제한된 자원으로 사람들은 이 제한된 자원을 자신의 사회·경제활동에 적절히 이용하여 자신의 효용을 극대화한다는 면에서 볼 때 Davis와 Rogers의 정의는 타당하다고 할 수 있다. 그러나 시간은 일반경제재와는 달리 다른 사람들에게 양도할 수 없고 저장할 수 없기 때문에 시간에 대한 시장가격을 정의할 수 없을 뿐만 아니라 각 개인마다 각기 다른 가치를 가지고 있으므로 측정이 매우 어렵고 통행의 목적이 되는 사회·경제활동의 가치에 따라 다르므로 측정에 많은 어려움이 있다.

통행시간가치에 대한 이론적 연구와 실증적 연구는 1960년대 중반부터 시작되었고, 그 이전까지의 통행시간가치는 연구자의 직관에 의해 가정된 값을 이용하였다. 그러나 1960년대 중반부터 통행시간가치 측정에 관한 체계적인 연구가 시작되었으며, 이때부터 시작된 통행시간가치 측정연구는 크게 이론적 연구와 실증적 연구로 구분할 수 있다.

2.3.1 이론적 연구와 실증적 연구

1) 이론적 연구

경제학이론에서 시간개념은 노동과 여가에 대한 시간할당문제로 소비자는 이용 가능한 총 시간을 여가시간과 노동시간에 할당하는데 노동시간의 양은 소득과 연관되기 때문에 결국 소비자는 효용이 최대가 되도록 소득과 여가의 적절한 조합을 선택한다고 가정하고 있다. 여기서 여가에 대한 한계가치는 소비자의 임금률과 동일하기 때문에 시간절감의 가치를 임금률로 추정하는 방법인 한계임금률법(marginal wage rate method)의 이론적 근거가 되고 있다.

이러한 시간개념을 모형에 처음으로 도입한 것은 Becker(1965)로 Becker는 소비자의 활동에 필요한 변수로 재화와 시간을 선정하여 소비활동을 할 때 할당

된 재화와 시간의 양에 따라서 소비자가 얻는 효용함수를 가정하였다. 소비자는 가용재원과 가용시간의 범위 내에서 특정소비활동에 재화와 시간을 할당하여 자신의 효용함수를 극대화하여 시간을 절감하게 되는데 이 절감된 시간의 가치를 화폐단위로 표시할 수 있는 식을 유도하였다.

De Donnea(1972)는 Becker의 소비자행동 이론을 다른 각도에서 응용하였는데, 통행환경에 관한 질적인 요소도 통행자의 시간가치에 영향을 미친다고 가정하고 통행환경의 질적인 요소를 포함하는 통행자의 효용함수를 제시하여 정성적인 접근을 시도하였다. De Donnea의 연구는 통행행태에 대한 의사결정을 분석하기 위해 시간할당 모형을 응용했다는 데에서 그 의의를 찾아볼 수 있다.

Becker모형과 De Donnea모형은 시간요소가 간접적으로 소비자의 효용함수에 반영되는데 이것의 가장 큰 문제는 이론을 실증단계로 옮기는 것이 곤란하다는 것이다. 이에 반해 De Serpa(1971)는 시간요소를 직접 효용함수에 반영한 시간가치를 유도한 이론으로 다음과 같다.

De Serpa는 한 개인의 효용(U)은 재화(x)벡터와 다양한 활동에 이용되는 시간(t)벡터, 다양한 활동 중 노동에 할당된 시간(t_w)에 의존한다고 가정하고 있다. 효용은 다음에 열거하는 4가지 제약조건하에서 최대화 된다. 첫째는 예산제약으로 재화의 가격(p)과 재화의 양(x)에 의해 결정되는 지출액은 임금률(w)과 노동시간(t_w)에 의해 얻어지는 소득($w \cdot t_w$)과 그 외의 소득(y)의 합을 초과할 수 없다. 둘째는 시간제약으로 모든 활동에 이용된 시간은 이용 가능한 시간(T)과 동일해야 한다. 셋째는 노동시간에 대한 제약으로 노동시간은 최소투입시간(t_w^m)을 필요로 한다는 가정에 입각하고 있는데 노동시간을 제약 없이 변경할 수 있다는 가정은 비현실적이기 때문에 최저투입시간을 도입한 것이라 볼 수 있다. 마지막으로 노동외의 활동시간에 대한 제약으로 활동에 이용되는 시간은 최소필요시간(t_i^m)을 필요로 한다는 것이다. 노동시간의 경우와 마찬가지로 최소필요시간은 0이 되는 경우도 존재한다.

상기의 내용을 정리하면 다음의 식(2.3.1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Max} \quad & U(x_1, x_2, \dots, x_m, t_1, t_2, \dots, t_n, t_w) \\
 \text{s.t.} \quad & w \cdot t_w + y \geq p \cdot x \\
 & T \geq \sum t_i + t_w \\
 & t_w \geq t_w^m \\
 & t_i \geq t_i^m
 \end{aligned} \tag{2.3.1}$$

상기의 식(2.3.1)은 x, t, t_w 에 대한 라그랑지(Lagrange) 함수로 풀 수 있으며, 라그랑지 함수는 다음의 식(2.3.2)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & U(x, t, t_w) + \lambda(w \cdot t_w + y - p \cdot x) + \mu(T - \sum t_i - t_w) \\
 & + \phi(t_w - t_w^m) + \sum \psi_i(t_i - t_i^m)
 \end{aligned} \tag{2.3.2}$$

여기서,

λ : 소득의 한계효용

μ : 시간의 한계효용

ϕ : 최소투입시간의 절감에 따른 한계효용

ψ_i : 활동 i 의 필요소요시간의 절감에 따른 한계효용

라그랑지 함수에 대한 1차 조건은 다음의 식(2.3.3)~식(2.3.5)과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial x_i} - \lambda \cdot p_i = 0 \tag{2.3.3}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t_i} - \mu + \psi_i = 0 \tag{2.3.4}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t_w} + \lambda \cdot w - \mu + \phi = 0 \tag{2.3.5}$$

De Serpa는 필요최소시간에 구속받지 않는 활동($\psi_i = 0$)을 순수여가활동(pure leisure activities)이라 정의하고, 그 외의 활동을 중간활동(intermediate activities)이라 정의하고 있으며 교통은 하나의 중간활동이라 보고 있다. 여기서 활동 j 의 시간요소에 대한 한계시간가치는 ψ_i/λ 이며 식(2.3.4)과 식(2.3.5)의 관계로부터 다음과 같은 식을 도출 할 수 있다.

$$\frac{\psi_i}{\lambda} = w + \frac{\partial U / \partial t_w}{\lambda} - \frac{\partial U / \partial t_i}{\lambda} + \frac{\phi}{\lambda} \quad (2.3.6)$$

여기서 첫째항과 둘째항은 노동시간에 투입할 경우에 대한 통행시간의 기회비용을, 셋째항은 이동하는데 시간을 소비했을 경우의 직접적 효용의 손실을 의미한다. 넷째항은 여가의 양을 제한하고 그 가치를 증가시키는 구속적인 노동시간제약에 대한 효과를 의미하는데 대부분의 이론이 노동시간의 제약을 받지 않는다고 가정하고 있기 때문에 넷째항은 0으로 볼 수 있다. 시간가치와 임금률이 동일하다는 한계임금률법의 가정은 우변의 우측 셋째항의 합이 0일 경우 성립한다. 식(2.3.6)은 이동시간보다 노동시간을 선호할 경우 시간가치는 임금률보다 높고 반대의 경우 시간가치는 임금률보다 낮은 결과를 보이고 있어 통행자의 통행환경에 대한 질적인 요소도 통행시간가치에 영향을 줄 수 있음을 시사하고 있다.

2) 실증적 연구

실증적 연구는 통행자가 통행수단, 경로 그리고 주거지 등의 선택행위를 근거로 통행시간 절감에 따라 지불하게 되는 비용의 크기를 측정하고, 이를 기초로 통행시간가치를 추정하고자 한 것으로 Beesley(1965)에 의해 시작되었다.

Beesley의 연구에서는 주로 통행자가 직면하는 통행수단, 통행경로, 주거지 등의 선택상황에 의거하여 시간가치를 추정하는 방식으로 발전되어 왔다.

Beesley는 출근시 교통수단이나 통행경로를 선택할 때 통행요금과 통행시간의 상대적 차이에 대하여 선택적으로 대응하는 '교환자 집단'을 분석대상으로 삼고, 그들을 소득수준별로 동질적인 집단으로 구분한 후 각 집단별로 통행시간과 통행요금의 차를 도표화하여 통행시간가치를 추정하였다. Beesley의 모형에서는 통계적인 추계는 시도되지 않았지만, 상쇄법(trade-off method)이 명백히 정립되었으며 다른 분석가들이 그 과정을 발전시킬 수 있는 길을 제시하였다.

Beesley와 유사한 연구로써 Lisco(1967)의 연구가 있는데, Lisco는 통행수단선택모형을 이용하여 통행시간가치를 추정하고 순수통행시간가치와 안락성 및 편의성의 가치를 구별하려고 시도하였으며, 통근자들은 혼잡하고 불편한 지하철보다 승용차로 통행하는 혜택을 위해 임금의 27%~53%까지 기꺼이 비용을 지불할 의도가 있다고 주장하였다.

2.3.2 국내외 선행연구

1) 국외 연구

(1) 영국

영국의 『비용·편익분석 매뉴얼 10판(COBA version 10), 2002』에서는 통행시간가치를 승용차, 소형화물차, 기타화물차, 버스 4개 차종으로 구분하여 통행목적별로 업무와 비업무통행으로 구분하여 다음의 Table2.3과 같이 통행시간가치를 추정하고 있다.

업무통행의 시간가치는 기본적으로 근로자에게 통행을 발생시키는 고용주의 입장에서 발생하는 비용으로 정의된다. 모든 업무통행의 시간절감은 근로자들이 추가적인 생산물을 발생시키는데 이용되며, 이 추가적인 생산물의 가치가 근로자들을 고용하는 비용으로 측정될 수 있다는 가설에 바탕을 두고 있다. 또한 근로자들은 통행시 그들의 입장이 아닌 고용주의 입장에서 행동한다는 가정 을 하고 있다. 예를 들면 통행시간을 절감하는 이유는 자신들의 여가시간을 늘리려한다기보다는 생산성을 향상시키는데 있다는 것이다. 마지막으로 운전직

종사자가 아닌 사람들은 통행하는 동안에 생산적인 일을 하지 않는다는 가정을 하고 있다.

비업무통행의 시간가치는 업무통행의 시간가치처럼 근로자의 시간을 임금으로 지불하는 직접적인 시장이 존재하지 않으므로 간접적인 접근방법을 이용하여 측정한다. 그러한 간접적인 접근방법으로서 SP조사방법을 이용하여 비업무통행의 시간가치를 추정한다.

Table 2.3 Travel time value of U.K.

Type of vehicle	Travel purpose	Occupancy	Travel time value(pence/hour)	
			per Person	per Vehicle
Passenger car	Business travel	Driver : 1.00 Rider : 0.22	1,744 1,369	2,045
	Non-business travel	Driver : 1.00 Rider : 0.60	374	598
Passenger car average	Assumption that percentage of business travel with 15.1%	Driver : 1.00 Rider : 0.54	—	817
Small truck	Business travel	Driver : 1.00 Rider : 0.20	731	877
	Non-business travel	Driver : 1.00 Rider : 0.59	374	595
Small truck average	Assumption that operating distance is 88% of business travel	Driver : 1.00 Rider : 0.25	—	843
The others truck	Business travel	Driver : 1.00	731	731
Bus	Business travel	Driver : 1.00	668	5,304
	Non-business travel	Rider : 12.1	374	
	Business travel	Rider : 0.10	1,109	

자료 : The COBA10 Manual(2002), 1998년 가격, 1pence≈20원.

주 : 승용차 1대당 평균 시간가치는 다음과 같이 추정됨.

(승 용 차 (업 무 통 행) × 1 5 . 1 % + 승 용 차 (비 업 무 통 행) × 84.9% = 2,045 × 15.1% + 598 × 84.9% = 817).

(2) 독일

독일의 경우에는 통행시간가치를 차종구분 없이 통행목적별로 업무와 비업무 통행으로 구분하여 다음의 Table 2.4와 같이 통행시간가치를 추정하고 있다.

업무통행의 시간가치는 절감된 통행시간만큼 생산 활동에 투입할 수 있다는 한계생산성 이론에 입각하여 업무통행의 시간가치를 추정하고 있고, 비업무통행의 시간가치는 업무통행 시간가치의 20%정도로 추정하고 있다. 비업무통행의 시간가치 추정시 상대적으로 적은 시간에 대한 절감은 최저한계선을 설정했을 때와 그렇지 않았을 때의 통행시간가치의 절약은 약 44%의 차이를 보이며, 최저한계선을 적용할 때의 비업무통행의 시간가치는 DM 3.50으로 추정되고 있다.

Table 2.4 Travel time value of Germany

Travel Purpose		Travel time value(DM/hour)
Business travel(년간 업무시간이 2,000시간일 때)		24.00
Non-business travel	최저한계선을 설정하지 않았을 경우	5.00
	최저한계선을 설정했을 경우	3.50

자료 : Macroeconomic Evaluation Vol.69, 1986, 1DM≒700원

(3) 노르웨이

노르웨이의 경우에는 통행시간가치에 영향을 미치는 각각의 요인을 통행목적별로 사적목적과 업무목적으로 구분하고, 도시간 통행과 도시내 통행으로 구분하여 다음의 Table 2.5~Table2.8과 같이 통행시간가치를 추정하고 있다.

통행목적별로 도시간 통행과 도시내 통행의 통행시간가치를 비교해보면 도시간 통행시간가치가 도시내 통행시간가치보다 높게 추정되고 있는 것으로 나타났다.

Table 2.5 Intercity travel time value of private travel(Norway)

(단위 : NOK/hour)

More than 50km	Passenger car	Perry	Railroad	Bus	Airline
Boarding time	86(±10)	75(±13)	54(±7)	48(±8)	163(±25)
Waiting time	—	32	7	3	18

Table 2.6 Intracity travel time value of private travel(Norway)

(단위 : NOK/hour)

Travel time	Passenger car	Transit	Railroad
Boarding time	39(±4)	29(±4)	48(±14)
Walking time	65	31	56
Delay time	77	107	122
Waiting time	—	12	30

Table 2.7 Intercity travel time value of business travel(Norway)

(단위 : NOK/hour)

More than 50km	Passenger car	Perry	Railroad	Bus	Airline
Boarding time	185(±41)	102(±44)	118(±28)	59(±21)	313(±67)
Waiting time	—	70	13	9	67

Table 2.8 Intracity travel time value of business travel(Norway)

(단위 : NOK/hour)

Travel time	Passenger car	Transit
Boarding time	87(±27)	80(±48)
Walking time	—	59
Delay time	139	111

(4) 미국

미국의 경우에는 통행목적을 업무통행과 비업무통행(출근통행)으로 구분하고 있으며, 차종은 자가용과 4륜 트럭으로 구분하여 다음의 Table 2.9와 같이 통행 시간가치를 추정하고 있다. 미국연방도로청(Federal Highway Administration, FHWA)에서 발간된 1994 HERS(Highway Economic Requirement System)에서 제시된 통행시간가치 추정결과를 살펴보면 다음과 같다.

Table 2.9 Travel time value of U.S.A.

Travel purpose		Travel time value(won/hour)	
		Passenger car	Four wheels truck
Business travel		11,118	9,860
Non-business travel (attendance travel)	Value	6,539	6,539
	Weighted average	7,015	7,951

자료 : FHWA, HERS, 1994

주 : 1988년 불변가격, 1\$=731원

(5) 일본

일본에서는 통행시간가치를 통행목적별로 구분하지 않는 대신에 통행의 요일별 특성을 반영하여 휴일과 평일로 구분하여 승용차, 버스, 소형화물차, 보통화물차 네 개 차종으로 구분하여 다음의 Table 2.10과 같이 통행시간가치를 추정하고 있다.

승용차와 버스의 통행시간가치는 각각 평일을 기준으로 추정하고 있고, 화물차의 통행시간가치는 휴일과 평일에 관계없이 같은 통행시간가치를 추정하고 있다.

승용차와 버스는 시간당 임금과 차종별 승차인원수를 고려하여, 1대당 통행 시간가치를 설정하고 있다. 휴일의 승용차 및 버스의 통행시간가치는 휴일 노동에 대한 할증과 평균승차인원을 고려하여 평일 시간가치의 1.5배로 설정하고

있다. 시간가치의 할증은 국가공무원과 서비스산업의 휴일 임금 할증율이 35~40%, 여관이나 골프장 등의 휴일 이용 요금 할증율이 20~30%인 바, 승용차 통행시간가치는 평일보다 약 10% 높게 추정하고 있다. 승용차의 평균승차인원은 평일과 휴일이 각각 1.44명대, 2.01명/대로, 휴일의 평균승차인원이 평일의 1.4배를 나타냄으로써 이 두 가지 요소를 합하여 승용차의 휴일 통행시간가치를 추정하고 있다. 화물차의 경우 화물차를 이용하는 것은 항상 업무목적이므로 휴일과 평일에 관계없이 동일한 통행시간가치를 적용하고 있다.

Table 2.10 Travel time value of Japan

Type of vehicle	Travel time value(yen/vehiclehour)			
	Passenger car	Bus	Small truck	Normal truck
Weekday	3,360	29,760	5,400	6,060
Holiday	5,040	44,640	5,400	6,060

주 : 1999년 가격, 1엔=10원

2) 국내 연구

국내의 통행시간가치 추정에 관한 기존 연구사례를 보면 Table 2.11에서 보는 바와 같이 통행시간가치 추정방법과 연구목적에 따라 매우 상이한 값을 보이고 있으나, 전반적으로 시간이 지남에 따라 명목소득의 증가로 인해 통행시간가치가 점차 증가하는 현상을 보이고 있다. 이는 물가지수의 상승을 반영함과 동시에 통행자의 통행패턴이 통행비용을 중요시하는 성향에서 통행시간을 중요시하는 성향으로 바뀌어 가고 있음을 시사하고 있는 것으로 판단된다.

국내의 경우 초기의 통행시간가치에 관한 연구는 교통사업의 타당성을 분석하거나 개별행태모형의 적용을 통한 통행자의 행태분석측면에서 이루어져 왔고, 근래에 들어서는 통행목적을 업무통행과 비업무통행으로 구분하여 통행시간가치 추정이 이루어지고 있으며, 비업무통행의 시간가치는 주로 통근통행과 통학통행, 통근통행, 통학통행만을 대상으로 연구가 실시되고 있다. 이는 비업

무통행 중 통근통행이나 통학통행을 목적으로 하는 통행에 대한 시간가치의 조사가 상대적으로 쉽기 때문이다.

(1) 도시간 통행시간가치에 관한 연구

KOTI(1997)의 『수도권 여객통행실태조사』 연구에서는 통행목적별 통근통행과 통학통행, 통근통행, 통학통행으로 구분하여 도보, 대기, 차내 시간의 통행시간가치를 각각 추정하였으며 대기 시간이 차내 시간보다 약 3배 정도 더 높게 추정되었다.

김현 등(1999)의 『통행목적별 수단별 통행시간가치산출 및 유의성 검정』 연구에서는 『1996년 수도권 통행실태조사』 자료 중 서울 통행을 중심으로 분석하여 통행목적별 통근통행과 통학통행, 업무통행 등으로 구분하여 통행목적간 통계적인 차이를 검정하여 통행목적에 따른 승용차, 버스, 지하철의 통행시간가치를 추정하였다.

김태희 등(2003)의 『유료도로의 통행시간가치 산정에 관한 연구』에서는 지역을 수도권과 비수도권으로 구분한 후 통행목적별 업무통행과 비업무통행에 대해서 통행거리를 단거리(30분 이하), 중거리(30~90분), 장거리(90분 이상)별로 구분하여 통행시간가치를 추정하였으며, 수도권과 비수도권간의 통행거리별 통행시간가치를 살펴보면 수도권의 통행시간가치가 비수도권의 통행시간가치 보다 높은 것으로 나타났다.

KOTI(2004)의 『2004년 국가교통 DB구축 사업, 부산·울산광역시권』 연구에서는 통행목적별 업무통행과 비업무통행으로 구분하지 않고 통행시간가치를 추정하였다.

(2) 지역간 통행시간가치에 관한 연구

조남건(2001)의 『우리나라 지역간 통행의 시간가치 산출 연구』에서는 통행목적별 업무통행과 비업무통행으로 구분하여 승용차, 버스, 화물차 3개 차종에 대해서 통행시간가치를 추정하였으며, 업무통행의 시간가치에 대해서는 한계임

금율법을, 비업무통행의 시간가치에 대해서는 RP자료를 이용하여 한계대체율법을 적용하여 통행시간가치를 추정하였다.

KDI(2004)의 『도로·철도부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제4판)』에서는 통행목적을 업무통행과 비업무통행으로 구분하여 승용차와 버스 2개 차종에 대해서 통행시간가치를 추정하였으며, 업무통행의 시간가치에 대해서는 한계임금률법을, 비업무통행의 시간가치에 대해서는 업무통행의 시간가치비율을 사용하여 통행시간가치를 추정하였다.

Table 2.11 Study of travel time value estimation in Korea

Study	Travel time value(won/personhour)					Note
수도권 여객통행 실태조사 (KOTI, 1997)	구 분		도 보	대 기	차 내	한계대체율법(SP자료)
	통근통행+통학통행		8,633	27,624	10,111	
	통근통행		9,971	33,422	11,404	
	통학통행		6,628	18,130	7,145	
통행목적별 수단별 통행시간가치산출 및 유의성 검증 (김현외 2인, 1999)	구 분		승용차	버 스	지하철	한계대체율법(1996년 수도권 통행실태조사, RP와 SP자료)
	통근통행+통학통행		8,198	639	1,082	
	업무통행		14,704	1,218	1,062	
	통근통행		10,947	974	987	
우리나라 지역간 통행의 시간가치 산출 연구 (조남건, 2001)	구 분		승용차	버 스	화물차	업무통행 : 한계임금률법 비업무통행 : 한계대체율법(RP자료)
	업무통행		9,306	7,558	7,420	
	비업무통행		3,042	1,516		
유료도로의 통행시간가치 산정에 관한 연구 (김태희외 5인, 2003)	구 분		단거리 (30분이하)	중거리 (30~90분)	장거리 (90분이상)	업무통행 : 한계임금률법 비업무통행 : 한계대체율법(SP자료)
	수도권	업무통행	8,863	10,218	11,630	
		비업무통행	4,384	7,039	7,790	
	비수도권	업무통행	8,246	9,503	10,816	
		비업무통행	4,077	6,546	7,245	
도로철도부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정보완연구(제4판) (KDI, 2004)	구 분		승용차	버 스	-	업무통행 : 한계임금률법 비업무통행 : 업무통행시간가치비용 사용
	업무통행		13,257	9,325	-	
	비업무통행		4,335	2,160	-	
2004년국가교통DB구 축사업(부산울산광역 권) (KOTI, 2004)	구 분		승용차	-	-	한계대체율법(RP자료)
	업무통행		7,754	-	-	
	비업무통행					

제 3 장 자료수집 및 특성분석

3.1 자료수집 및 분석방법

3.1.1 자료 조사지점

2006년 현재 부산광역시에는 제1도시고속도로인 변영로와 제2도시고속도로인 동서고가도로, 제3도시고속도로인 관문대로 등 3개의 도시고속도로가 개설되어 운영되고 있다.

이 연구에서는 1981년 개통되어 부산의 도심과 부도심을 연결하면서 비교적 균일한 출·퇴근통행패턴을 나타내는 제1도시고속도로(변영로)를 연구대상 도로구간으로 설정하였고, 그 외 제2도시고속도로(동서고가도로)와 제3도시고속도로(관문대로)는 대부분 길어깨 부분이 협소하여 관측 장비를 설치하는데 있어 교통사고의 위험성이 높을 뿐만 아니라 관측기간과 비용의 문제로 연구대상에서는 제외하였으며, 연구대상 조사지점은 제1도시고속도로(변영로)내에서 도심과 부도심지역에 근접하고 진입램프 상에서 과다한 진입차량으로 정체가 가중되는 도심방향(inbound)과 부도심방향(outbound)의 본선구간 2개 지점을 연구대상 지점으로 선정하여 각 차로별로 검지기 NC-97*를 설치하여 실시간 교통특성자료를 수집하였다.

이 연구대상 도시고속도로는 총 연장 15.7km, 폭원 22.4m, 차로수 양방향 4차로, 본선구간의 제한속도 80km/h, 연결로구간의 제한속도 50km/h의 자동차전용도로로 시점부의 문헌램프와 종점부의 구서램프를 포함하여 총 6개의 램프가 설치되어 운영되고 있으며, 연구대상 도로구간의 구체적인 도로의 기하구조 및 조사지점은 다음의 Table 3.1과 Fig. 3.1에서 보는 바와 같다.

* 차량자기영상(vehicle magnetic imaging, VMI)기술을 적용한 휴대용 교통 분석기(portable traffic analyzer)로 각 차종별 교통량, 속도, 점유율 등의 교통특성자료를 수집하는 장치를 말함.

Table 3.1 Geometric characteristics within the influence area

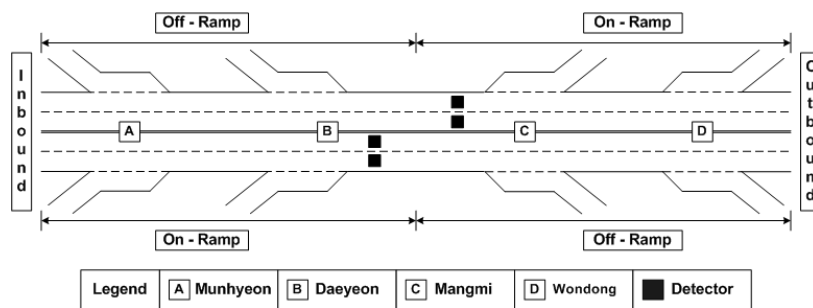
Ramp	Ramp A	Ramp B	Ramp C	Ramp D
	Munhyeon ¹⁾	Daeyeon ²⁾	Mangmi	Wondong
교통류 방향	부도심		도심	
변속차로의 형식	평행식			
차로수(lane),(본선/연결로)	2 / 1			
차로폭(m),(본선/연결로)	3.7 / 3.7~5.0			
제한속도(km/h),(본선/연결로)	80 / 50			
측방여유폭(m),(중앙분리대측/도로우측)	1.2 / 2.0			

주 : 1) 접속부 하류(테이퍼 끝 기준)의 전방 215m 지점에 터널 존재

2) 접속부 상류(노즈 기준)의 후방 108m 지점, 하류의 전방 127m 지점에 터널 존재



(a) Geometry under the study



(b) Equipments under the study

Fig. 3.1 Geometry and equipments under the study

3.1.2 자료 조사방법

이 연구에서는 연구대상 도로구간인 제1도시고속도로(번영로)내 도심방향과 부도심방향의 본선구간 2개 지점에 대해서 실시간 교통특성자료를 수집하기 위해 각 차로별로 검지기 NC-97를 설치하여 매 15분 간격으로 1일 24시간씩 2006년 6월부터 7월까지 일요일을 제외한 주중 6일(월요일~토요일)간 교통특성 자료를 수집하였으며, 관측기기 등의 오류로 인한 자료의 불충분이나 누락이 있는 경우에는 재 관측을 실시하여 연구에 활용하였다.

도심방향과 부도심방향의 본선구간 2개 지점 상에서 각 차로별로 검지기를 통해서 수집된 교통특성자료는 교통량, 속도, 점유율, 차두시간, 차종별 교통량 및 혼재비율, 속도구간별 교통량 등으로 교통량은 차종별로 길이에 따라 총 8개의 범주로 분류되어 수집되었고, 속도는 지점속도로 속도구간에 따라 총 14개의 범주로 다음의 Table 3.2와 같이 분류되어 수집되었다.

Table 3.2 Speed intervals and mean values

(단위 : km/h)

Seed interval	Mean speed(u_i)	Seed interval	Mean speed(u_i)	Seed interval	Mean speed(u_i)
1	0~7	6	40~47	11	80~87
2	8~15	7	48~55	12	88~95
3	16~23	8	56~63	13	96~103
4	24~31	9	64~71	14	104~111
5	32~39	10	72~79	15	112~

3.1.3 자료 분석방법

이 연구대상 제1도시고속도로(번영로)내 도심방향과 부도심방향의 본선구간은 통행특성 및 속도특성분포가 주중과 주말에 상이하나 주말에 비하여 상대적으로 주중에 출·퇴근통행으로 정체가 심화되기 때문에 일요일을 제외한 주중자료를 중심으로 교통특성분석을 하였다.

교통류율은 차종별로 총 8개의 범주로 분류된 교통량을 차종별 길이에 따라 각각 6m미만, 6~12m미만, 12m초과 기준으로 소형, 중형, 대형으로 구분한 후 우리나라 도로용량편람(korea highway capacity manual, KHCM)에 기초하여 고속도로 기본구간인 구배 $\pm 3\%$ 이내의 평지지형기준에 따라 다음의 Table 3.3과 같은 승용차 환산계수(passenger car equivalent, PCE)와 중차량 보정계수(f_{HV})를 고려하여 승용차 환산단위의 교통류율로 산정하였고, 속도는 속도구간별로 총 14개의 범주로 분류된 속도구간별 교통량자료로부터 공간평균속도를 산정하였으며, 밀도는 평균차두시간과 공간평균속도 및 중차량 보정계수로부터 평균밀도를 산정하여 개별 교통특성과 교통특성간 상호관계를 분석하였다.

Table 3.3 Type of vehicle and passenger car equivalents

Types of vehicle		Length of vehicle	Passenger car equivalent (PCE)
소형 (E_{T0})	2.5톤 미만트럭, 12인승 미만 소형버스	6m 미만	1.0
중형 (E_{T1})	2.5톤 이상 트럭, 버스	6~12m 미만	1.5
대형 (E_{T2})	세미트레일러 또는 풀트레일러	12m 초과	2.0

3.2 교통특성 분석

이 연구대상 도시고속도로의 도심방향과 부도심방향의 본선구간상에 각 차로 별로 설치된 검지기로부터 관측된 주요 교통특성자료의 개별 교통특성을 파악하기 위해서 전일별, 요일별, 차로별 등으로 구분하여 교통특성 분석을 수행하였다.

3.2.1 교통류율(Flow rate)

교통량(volume)은 일정시간동안 도로의 한 지점을 통과한 차량대수를 말하고, 교통류율(flow rate)은 1시간보다 짧은 시간간격(보통 15분)동안 도로의 한 지점을 통과한 차량대수를 1시간단위로 환산한 교통량으로 vehicle per hour (veh/h)로 나타내며, 이에 중차량 보정계수를 고려하면 승용차 환산단위인 passenger-car per hour(pc/h)로 나타낼 수 있다.

따라서 이 연구에서는 도심방향과 부도심방향의 본선구간에 각 차로별로 설치된 검지기로부터 관측된 15분 단위의 교통량을 1시간단위의 교통류율로 환산하기 위해 다음의 식(3.2.1)과 식(3.2.2)을 이용하여 교통류율을 산정하였다.

$$q_T = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^2 \left(\frac{4 \times v_i}{f_{HV_i}} \right) \quad (3.2.1)$$

$$f_{HV_i} = \frac{1}{1 + P_{T1}(E_{T1} - 1) + P_{T2}(E_{T2} - 1)} \quad (3.2.2)$$

여기서,

q_T : 전체차로의 평균교통류율(pc/h)

v_i : 15분 교통량(veh/15min)

f_{HV_i} : i 차로의 중차량 보정계수

P_{T1} : 중형차량(T_1)의 구성비(%)

P_{T2} : 대형차량(T_2)의 구성비(%)

E_{T1} : 중형차량(T_1)의 승용차 환산계수(1.5)

E_{T2} : 대형차량(T_2)의 승용차 환산계수(2.0)

이 연구대상 도시고속도로 본선구간상의 교통류율 분석결과를 도심방향과 부도심방향기준으로 전일별, 요일별, 차로별, 전체차로 평균 교통류율별로 구분하여 살펴본 결과 다음과 같았다.

전일별 교통류율의 경우 관측기간 동안 도심방향과 부도심방향의 모든 지점에서 교통류율이 오전 06:00이후에 급격히 증가하여 오후 10:00시까지 높은 상태를 유지하고 있는 것으로 나타났고, 심야시간대(오후 10:00~익일 06:00)를 제외한 비심야시간대에는 지속적인 첨두(peak)현상을 보이고 있는 것으로 나타났다. 이는 과거 출·퇴근시간대에 차량이 집중되는 통행특성이 생활수준향상에 따른 차량이용수요의 증가와 다양한 경제활동 등에 따른 통행환경의 변화에 따른 것으로 판단되었다. 요일별 교통류율의 경우 도심방향과 부도심방향의 모든 지점에서 모든 요일에 걸쳐서 교통류율 변동패턴이 거의 유사한 패턴을 보이고 있는 것으로 나타났다. 차로별 교통류율의 경우 1차로 평균 교통류율은 도심방향이 1,250~1,370 pc/h , 부도심방향이 946~1,148 pc/h 로 나타났고, 2차로 평균 교통류율은 도심방향이 1,011~1,136 pc/h , 부도심방향이 734~820 pc/h 로 나타나 도심방향과 부도심방향 모두에서 1차로가 2차로보다 차로 이용효율이 높은 것으로 나타났다. 전체차로 평균 교통류율의 경우 최대 교통류율은 도심방향이 1,638~1,874 pc/h , 부도심방향이 1,142~1,428 pc/h 로 도심방향이 약 450~500 pc/h 정도 높은 것으로 나타났고, 평균 교통류율은 도심방향이 1,134~1,201 pc/h , 부도심방향이 840~979 pc/h 로 도심방향이 약 200~330 pc/h 정도 높은 것으로 나타났는데, 이는 부도심지역의 주거지역에서 도심지역의 상업업무지역으로 출·퇴근시간대에 차량통행이 집중되기 때문인 것으로 판단되었다(Table 3.4 및 Table 3.5, Fig. 3.2 및 Fig. 3.3 참조).

이 연구대상 도시고속도로의 교통류율 분석을 종합한 결과, 심야시간대를 제외한 모든 시간대에 걸쳐서 차량이용수요가 집중하여 도시고속도로의 본선구간상에서 교통혼잡이 발생하고 있는 실정이므로 도시고속도로의 본선교통량 집중도를 적절히 조절하여 차량소통원활화를 도모할 수 있도록 램프미터링시스템

(ramp metering system, RMS)의 도입과 함께 혼잡통행료 부과정책 등과 같은 다양한 교통수요관리방안이 수립되어야 할 것으로 판단되었다.

Table 3.4 Results of flow rate analysis by lanes at the inbound

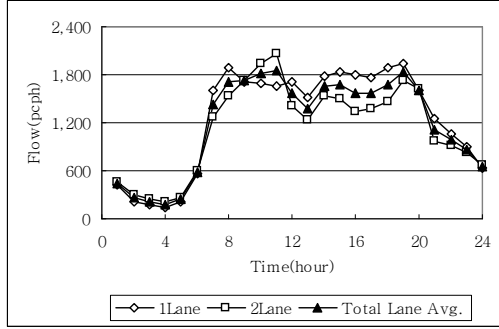
(단위 : pc/h)

Day of the week	1Lane			2Lane			Total Lane Avg.		
	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
Monday	136	1,936	1,250	212	2,060	1,136	174	1,858	1,193
Tuesday	148	2,012	1,354	216	1,736	1,031	192	1,874	1,192
Wednesday	160	2,020	1,326	184	1,644	1,042	180	1,736	1,184
Thursday	140	1,940	1,256	228	1,608	1,011	184	1,774	1,134
Friday	112	1,896	1,262	196	1,576	1,038	154	1,638	1,150
Saturday	196	1,944	1,370	244	1,656	1,032	220	1,784	1,201

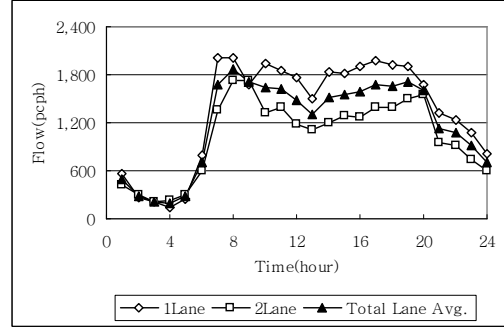
Table 3.5 Results of flow rate analysis by lanes at the outbound

(단위 : pc/h)

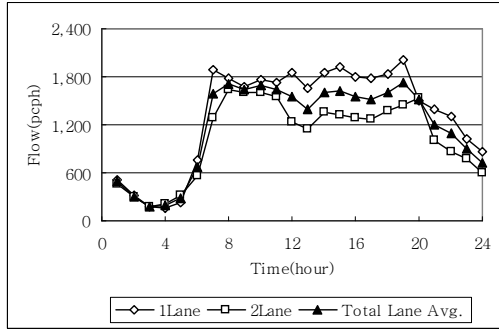
Day of the week	1Lane			2Lane			Total Lane Avg.		
	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
Monday	124	1,596	1,067	120	1,120	791	122	1,328	929
Tuesday	188	1,608	1,100	172	1,180	820	180	1,326	960
Wednesday	196	1,592	1,148	164	1,180	810	180	1,312	979
Thursday	180	1,656	1,118	152	1,200	808	166	1,428	963
Friday	244	1,624	1,093	184	1,192	795	216	1,348	944
Saturday	256	1,340	946	212	1,068	734	240	1,142	840



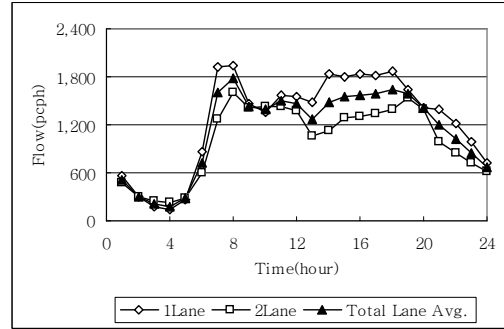
(a) Monday



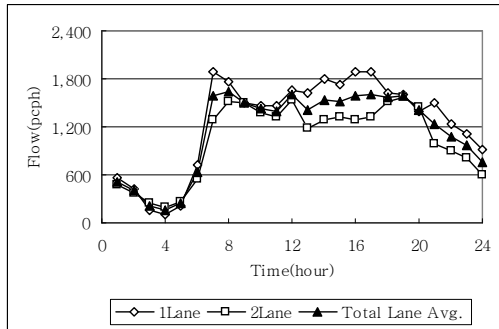
(b) Tuesday



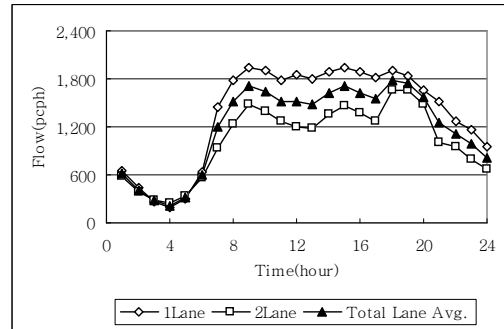
(c) Wednesday



(d) Thursday

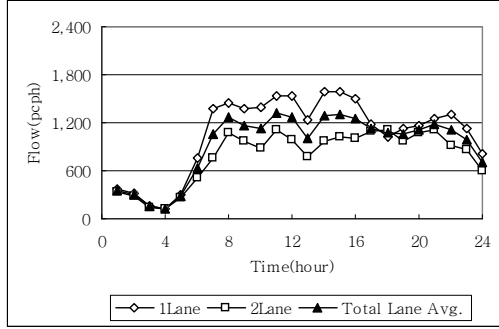


(e) Friday

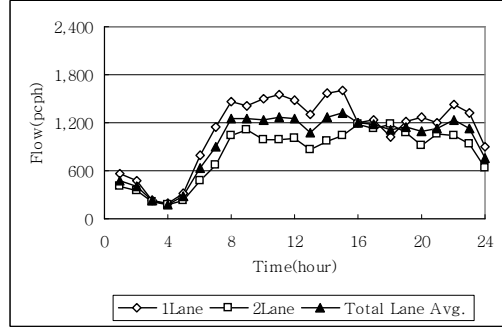


(f) Saturday

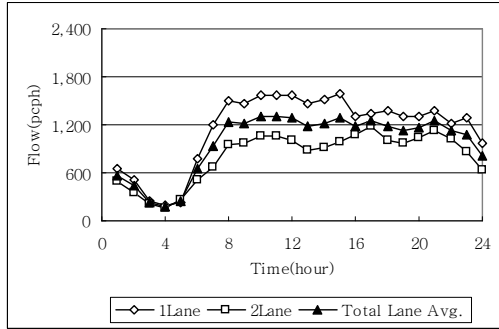
Fig. 3.2 Flow rate distributions by lanes at the inbound



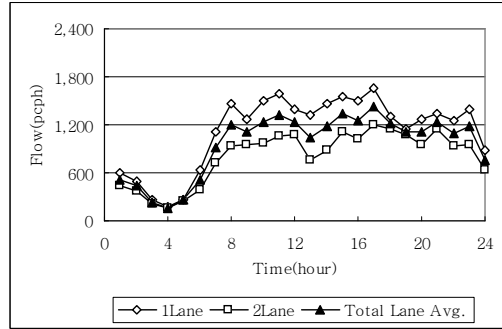
(a) Monday



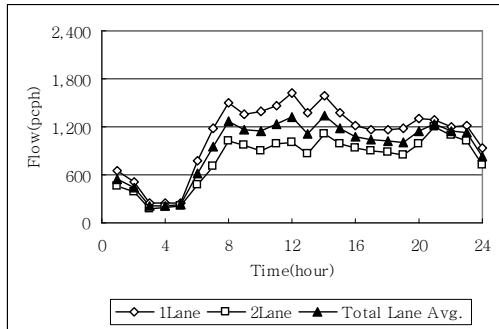
(b) Tuesday



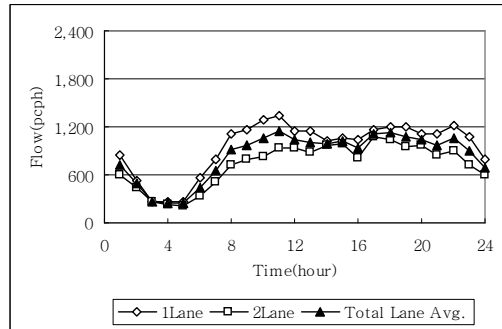
(c) Wednesday



(d) Thursday



(e) Friday



(f) Saturday

Fig. 3.3 Flow rate distributions by lanes at the outbound

3.2.2 속도(Speed)

속도는 단위시간동안에 주행한 거리로 단위는 kilometer per hour(km/h)로 나타내며, 이 연구에서 관측된 속도는 지점속도인 시간평균속도(time mean speed)로서 공간평균속도(space mean speed)로 환산하여 분석에 활용하였다.

시간평균속도는 단위시간동안 도로상의 특정지점을 통과한 모든 차량들의 속도를 산술평균한 속도로 산정식은 다음의 식(3.2.3)과 같고, 공간평균속도는 단위시간동안 도로구간을 통과한 모든 차량들이 주행한 거리를 주행시간으로 나눈 속도로 산정식은 다음의 식(3.2.4)과 같다.

이 연구에서는 다음의 식(3.2.5)을 이용하여 공간평균속도를 산정하였다.

$$u_t = \frac{\sum n_i u_i}{\sum n_i} \quad (3.2.3)$$

$$u_s = \frac{\sum n_i}{\sum \frac{n_i}{u_i}} \quad (3.2.4)$$

$$u_T = \frac{\sum_{i,j=1}^n v_{ij}}{\sum_{i,j=1}^n \left(\frac{v_{ij}}{u_{t_{ij}}} \right)} \quad (3.2.5)$$

여기서,

- n_i : 단위시간 15분 동안 j 속도구간 교통량($pc/15min$)
- u_i : 단위시간 15분 동안 j 속도구간 시간평균속도(km/h)
- u_t : 시간평균속도(km/h)
- u_s : 공간평균속도(km/h)
- v_{ij} : 단위시간 15분 동안 i 차로의 j 속도구간 교통량($pc/15min$)
- $u_{t_{ij}}$: 단위시간 15분 동안 i 차로의 j 속도구간 시간평균속도(km/h)
- u_T : 전체차로의 공간평균속도(km/h)
- i : 차로수($n=2$), j : 속도구간($n=14$)

이 연구대상 도시고속도로 본선구간의 속도 분석결과를 도심방향과 부도심 방향기준으로 전일별, 요일별, 차로별, 전체차로 평균 속도별로 구분하여 살펴본 결과 다음과 같았다.

전일별 속도의 경우 도심방향은 토요일을 제외한 모든 요일에 걸쳐서 출·퇴근시간대를 중심으로 속도가 약 30km/h 이하로 감소하는 것으로 나타났고, 부도심방향은 퇴근시간대를 중심으로 속도가 약 25km/h 이하로 감소하는 것으로 나타났으며, 도심방향과 부도심방향의 그 외 시간대에서는 약 $50\sim 60\text{km/h}$ 이상의 속도를 유지하는 것으로 나타났다. 도심방향은 출·퇴근시간대에 속도가 감소하는 반면에 부도심방향은 퇴근시간대에만 속도가 감소하는 이유는 부도심지역은 토지이용이 주거지지역 위주로 이용되기 때문에 퇴근시간대에 차량이용이 집중하는 반면에 도심지역은 상업업무지역 위주로 출·퇴근시간대에 차량이용이 집중되기 때문인 것으로 판단되었다. 요일별 속도의 경우 도심방향은 토요일을 제외한 모든 요일에 걸쳐서 속도 변동패턴이 유사하게 나타난 반면에 부도심방향은 모든 요일에 걸쳐서 속도 변동패턴이 거의 유사한 것으로 나타났다. 차로별 속도의 경우 1차로 평균 속도는 도심방향이 $55.94\sim 66.56\text{km/h}$, 부도심방향이 $47.80\sim 56.19\text{km/h}$ 로 나타났고, 2차로 평균 속도는 도심방향이 $51.87\sim 58.53\text{km/h}$, 부도심방향이 $46.99\sim 53.23\text{km/h}$ 로 나타나 도심방향과 부도심방향 모두에서 1차로가 2차로보다 속도가 더 높은 것으로 나타났다. 전체차로 평균 속도의 경우 평균 속도는 도심방향이 $53.92\sim 62.18\text{km/h}$, 부도심방향이 $47.37\sim 54.92\text{km/h}$ 로 도심방향이 약간 더 높은 것으로 나타났다(Table 3.6 및 Table 3.7, Fig. 3.4 및 Fig. 3.5 참조).

이 연구대상 도시고속도로의 속도 분석을 종합한 결과, 출·퇴근시간대를 중심으로 차량이용수요가 집중하여 도시고속도로 본선구간의 속도가 $25\sim 30\text{km/h}$ 이하로 도시고속도로의 기능인 이동성의 기능을 다하지 못하고 있는 실정으로 도시고속도로 본선구간의 차량 속도가 최대한 유지될 수 있도록 램프미터링시스템의 도입과 함께 혼잡통행료 부과정책 등과 같은 다양한 교통수요관리방안이 수립되어야 할 것으로 판단되었다.

Table 3.6 Results of speed analysis by lanes at the inbound

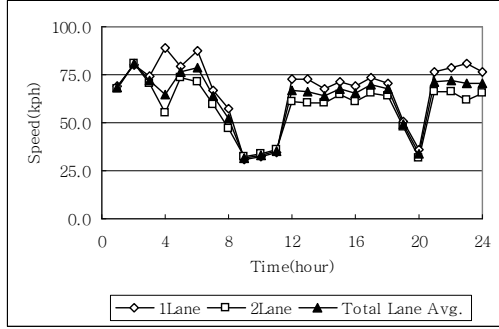
(단위 : km/h)

Day of the week	1Lane			2Lane			Total Lane Avg.		
	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
Monday	30.60	88.83	66.56	31.60	81.08	58.53	31.57	80.78	62.18
Tuesday	31.97	75.67	62.01	35.31	67.04	57.72	33.58	69.98	59.95
Wednesday	29.92	76.25	57.90	29.04	67.97	54.19	29.47	69.96	56.18
Thursday	27.74	78.14	57.17	26.75	69.83	53.72	27.22	70.92	55.58
Friday	27.89	74.55	55.94	27.41	68.41	51.87	27.64	70.40	53.92
Saturday	33.43	74.09	62.14	32.74	68.16	57.90	33.10	71.01	60.18

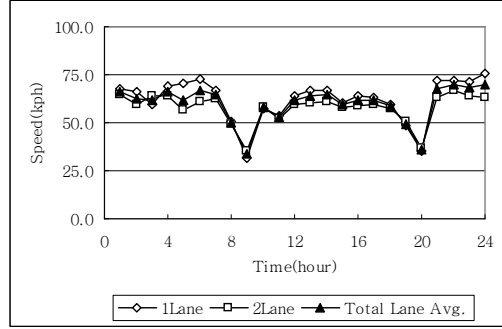
Table 3.7 Results of speed analysis by lanes at the outbound

(단위 : km/h)

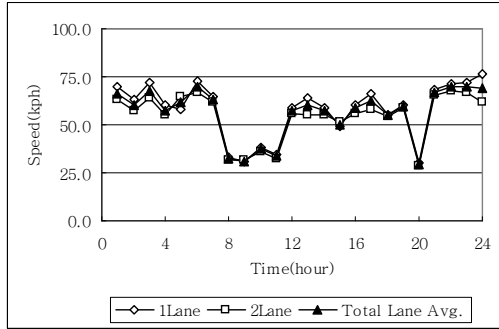
Day of the week	1Lane			2Lane			Total Lane Avg.		
	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
Monday	22.64	69.93	56.19	22.67	71.44	53.23	22.65	70.34	54.92
Tuesday	23.33	73.84	54.80	23.12	65.93	49.62	23.72	69.78	52.49
Wednesday	24.55	74.13	54.58	22.86	62.52	47.74	23.92	68.07	51.45
Thursday	26.86	65.16	52.92	23.46	66.57	51.58	25.29	65.50	52.28
Friday	23.38	66.67	47.80	21.33	65.22	46.99	22.81	66.05	47.37
Saturday	24.49	67.71	48.56	21.38	66.60	47.67	23.05	66.89	48.09



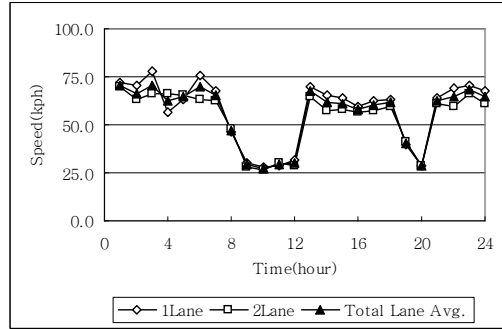
(a) Monday



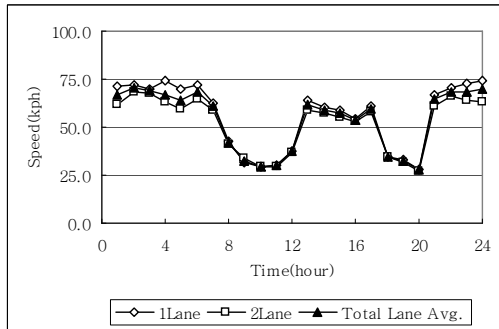
(b) Tuesday



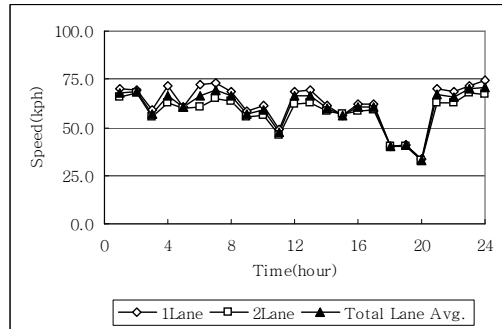
(c) Wednesday



(d) Thursday

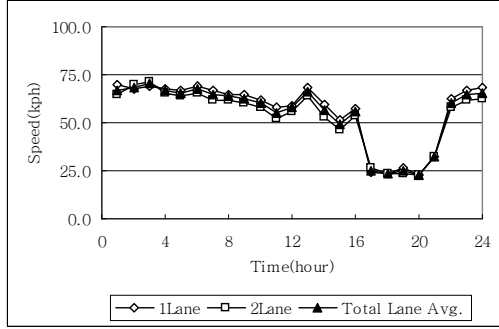


(e) Friday

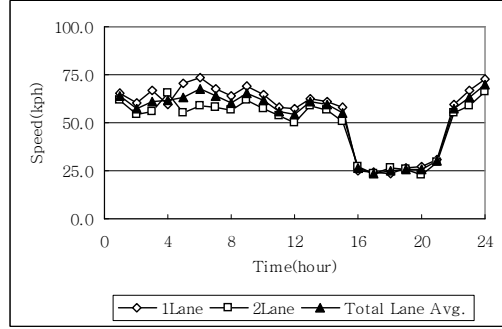


(f) Saturday

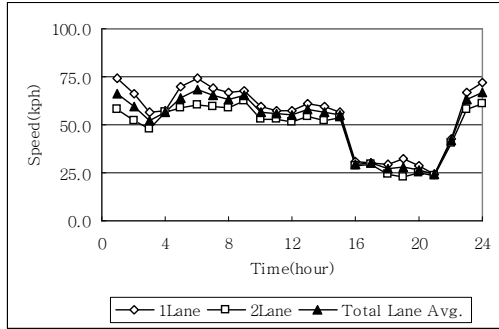
Fig. 3.4 Speed distributions by lanes at the inbound



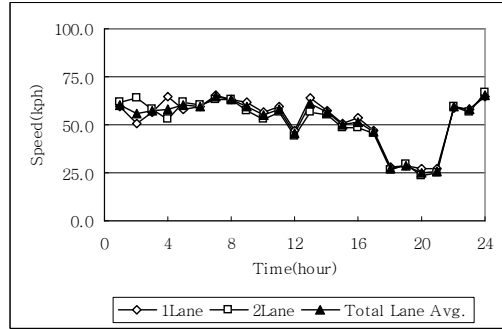
(a) Monday



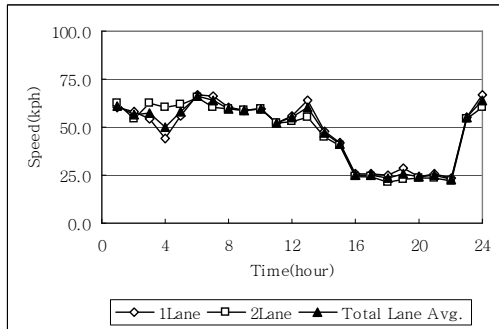
(b) Tuesday



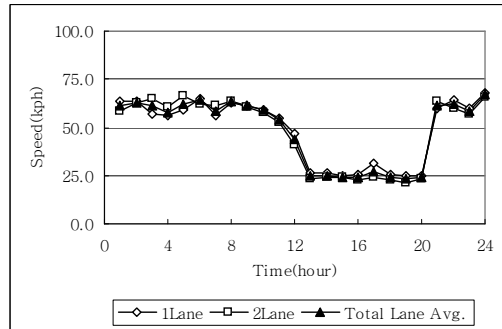
(c) Wednesday



(d) Thursday



(e) Friday



(f) Saturday

Fig. 3.5 Speed distributions by lanes at the outbound

3.2.3 밀도(Density)

밀도는 단위구간 내에 들어 있는 차량대수를 나타내는 것으로 한 차로를 점유하고 있는 차량대수를 구간 길이로 나눈 값으로 vehicle per kilometer (veh/km)로 나타내며, 이에 중차량 보정계수를 고려하면 승용차 환산단위인 passenger-car per kilometer(pc/km)로 나타낼 수 있다.

따라서 이 연구에서는 평균차두시간과 공간평균속도 및 중차량 보정계수를 바탕으로 다음의 식(3.2.6)과 식(3.2.7)을 이용하여 평균밀도를 산정하였다.

$$h = \frac{\sum (t_i - t_{i-1})}{\sum n_i} \quad (3.2.6)$$

$$k_T = \sum_{i=1}^2 \frac{3.6 \times f_{HV_i}}{h_i \times u_i} \quad (3.2.7)$$

여기서,

h : 15분 동안 평균차두시간(sec)

t_i : i 번째 차량의 도착시간(sec)

t_{i-1} : $i-1$ 번째 차량의 도착시간(sec)

n_i : 15분 동안 교통량($pc/15min$)

f_{HV_i} : i 차로의 중차량 보정계수

h_i : i 차로의 15분 동안 평균차두시간(sec)

u_i : i 차로의 15분 동안 공간평균속도(km/h)

k_T : 전체차로의 평균밀도(pc/km)

이 연구대상 도시고속도로 본선구간상의 밀도 분석결과를 도심방향과 부도심 방향기준으로 전일별, 요일별, 차로별, 전체차로 평균 밀도별로 구분하여 살펴본 결과 다음과 같았다.

전일별 밀도의 경우 도심방향은 토요일을 제외한 모든 요일에 걸쳐서 출·퇴근시간대를 중심으로 밀도가 약 $50pc/km$ 이상으로 급격히 증가하는 것으로 나

타났고, 부도심방향은 퇴근시간대를 중심으로 밀도가 약 $45pc/km$ 이상으로 증가하는 것으로 나타났다. 요일별 밀도의 경우 도심방향은 토요일을 제외한 모든 요일에 걸쳐서 밀도 변동패턴이 유사하게 나타난 반면에 부도심방향은 모든 요일에 걸쳐서 밀도 변동패턴이 거의 유사한 것으로 나타났다. 차로별 밀도의 경우 1차로 평균 밀도는 도심방향이 $22.55\sim 27.33pc/km$, 부도심방향이 $22.76\sim 27.09pc/km$ 으로 나타났고, 2차로 평균 밀도는 도심방향이 $19.21\sim 24.24pc/km$, 부도심방향이 $18.46\sim 21.77pc/km$ 으로 나타나 도심방향과 부도심방향 모두에서 1차로가 2차로보다 밀도가 더 높은 것으로 나타났다. 전체차로 평균 밀도의 경우 최대 밀도는 도심방향이 $47.61\sim 55.30pc/km$, 부도심방향이 $46.68\sim 52.42pc/km$ 으로 나타났고, 평균 밀도는 도심방향이 $21.50\sim 25.78pc/km$, 부도심방향이 $20.73\sim 24.43pc/km$ 으로 도심방향의 밀도가 부도심방향의 밀도보다 약간 더 높은 것으로 나타났다(Table 3.8 및 Table 3.9, Fig. 3.6 및 Fig. 3.7 참조).

이 연구대상 도시고속도로의 밀도 분석을 종합한 결과, 출·퇴근시간대를 중심으로 차량이용수요가 집중하여 도시고속도로 본선구간의 밀도가 급격히 증가하고 있는 실정으로 도시고속도로의 본선교통량의 집중도를 적절히 조절하여 차량소통원활화를 도모할 수 있도록 램프미터링시스템의 도입과 함께 혼잡통행료 부과정책 등과 같은 다양한 교통수요관리방안이 수립되어야 할 것으로 판단되었다.

Table 3.8 Results of density analysis by lanes at the inbound

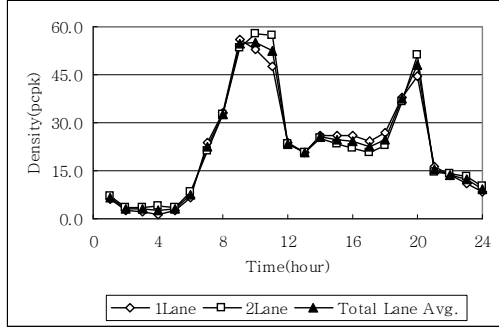
(단위 : pc/km)

Day of the week	1Lane			2Lane			Total Lane Avg.		
	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
Monday	1.53	55.82	22.55	3.39	57.74	22.94	2.69	55.30	22.74
Tuesday	2.14	52.42	23.80	3.39	49.05	19.21	2.90	50.74	21.50
Wednesday	2.43	54.52	26.31	2.86	53.03	22.47	2.65	52.81	24.39
Thursday	2.25	53.91	26.06	3.43	53.53	22.96	2.95	51.14	24.51
Friday	1.50	50.05	27.33	3.09	52.68	24.24	2.29	51.37	25.78
Saturday	2.75	49.78	23.87	3.91	45.45	19.34	3.33	47.61	21.60

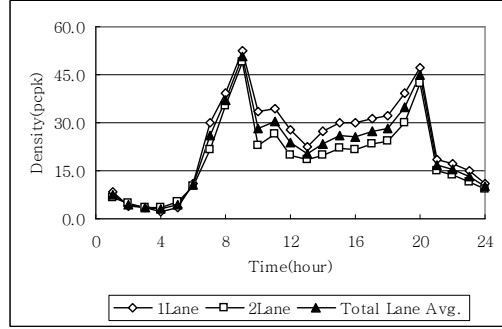
Table 3.9 Results of density analysis by lanes at the outbound

(단위 : pc/km)

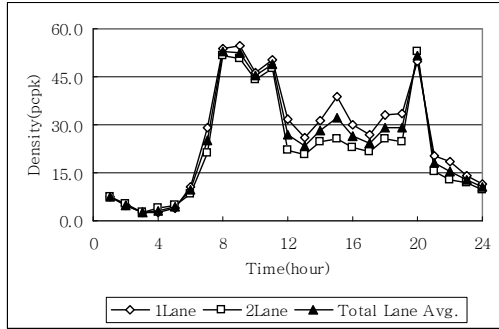
Day of the week	1Lane			2Lane			Total Lane Avg.		
	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
Monday	1.83	51.06	22.76	1.84	47.86	18.70	1.83	49.27	20.73
Tuesday	3.17	51.37	24.12	2.64	48.12	20.23	2.91	49.75	22.17
Wednesday	3.27	55.89	24.83	2.90	48.97	20.54	3.16	52.42	22.68
Thursday	2.79	48.97	23.60	2.89	46.15	18.46	2.84	47.56	21.03
Friday	4.52	53.28	27.09	2.95	50.38	21.77	3.77	50.18	24.43
Saturday	4.48	48.46	24.01	3.18	45.65	20.97	3.90	46.68	22.49



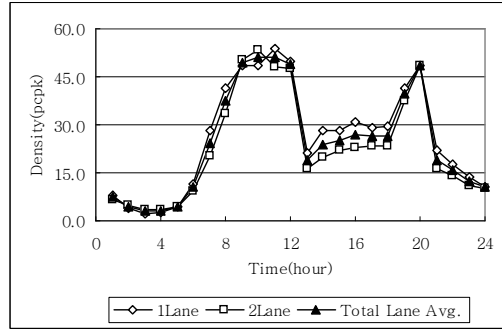
(a) Monday



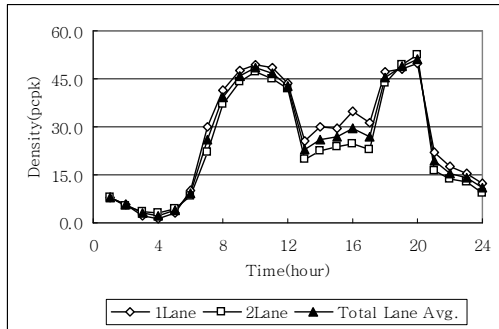
(b) Tuesday



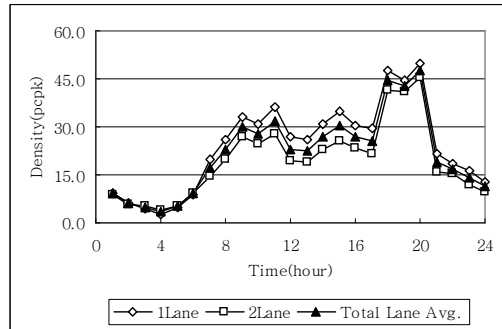
(c) Wednesday



(d) Thursday

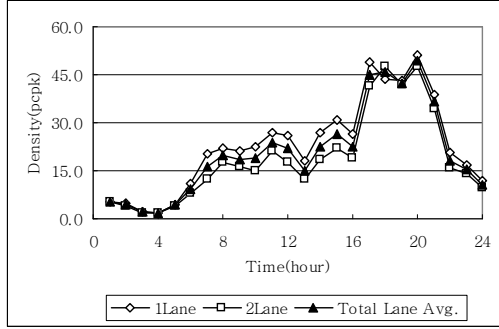


(e) Friday

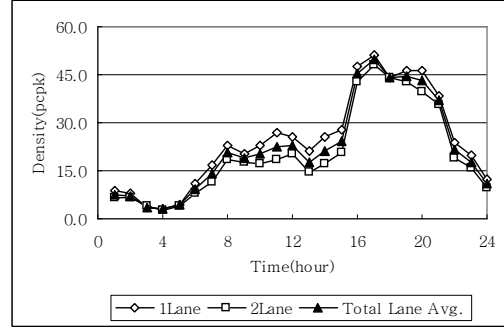


(f) Saturday

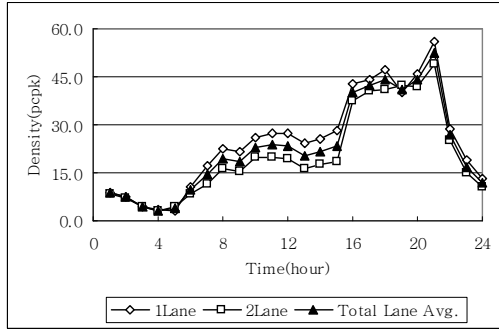
Fig. 3.6 Density distributions by lanes at the inbound



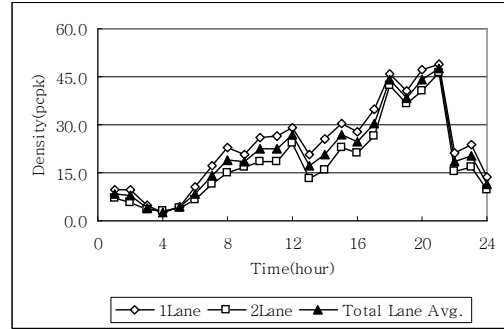
(a) Monday



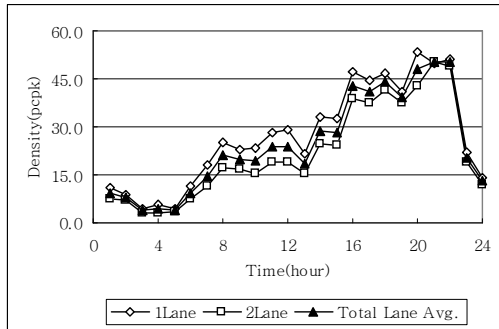
(b) Tuesday



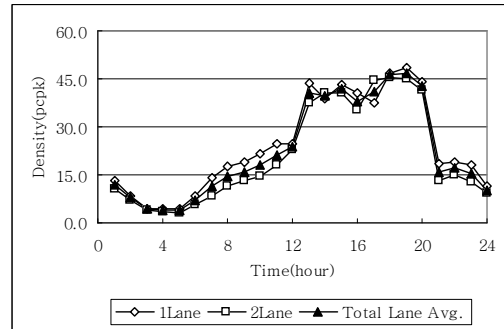
(c) Wednesday



(d) Thursday



(e) Friday



(f) Saturday

Fig. 3.7 Density distributions by lanes at the outbound

3.3 교통특성 상호관계 분석

이 연구에서는 도시고속도로의 도심방향과 부도심방향 본선구간상의 주요 교통특성간 상호관계를 파악하기 위해서 요일별 시간대별 분포와 산점도 등을 이용하여 교통특성간 상호관계 분석을 수행하였다.

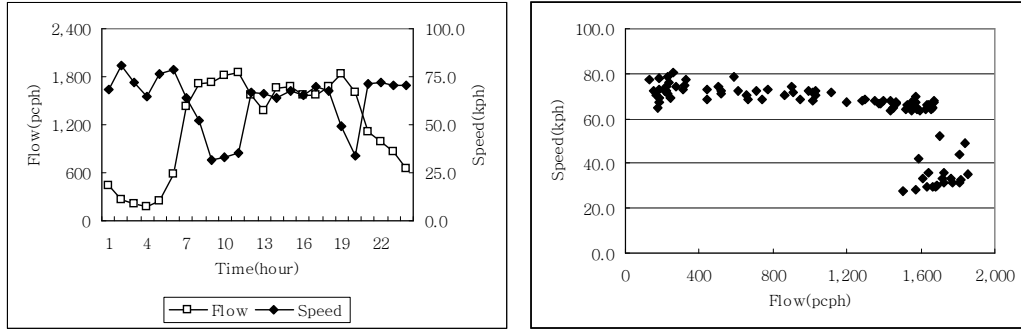
3.3.1 교통류율-속도 관계

이 연구대상 도시고속도로 본선구간상의 교통류율과 속도 관계 분석결과를 도심방향과 부도심방향기준으로 구분하여 요일별 시간대별 분포와 산점도를 이용하여 살펴본 결과 다음과 같았다.

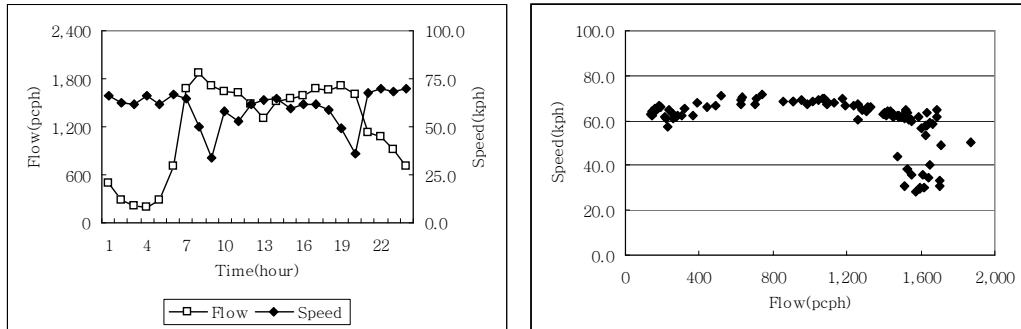
속도는 교통류율의 증가와 함께 점점 감소하여 최대 교통류율 상태에서 임계 속도에 도달하게 되는데 최대 교통류율 상태일 때 도심방향과 부도심방향의 임계속도를 비교해 보면, 도심방향의 경우 최대 교통류율이 $1,800pc/h$ 정도일 때 임계속도가 $30km/h$ 정도를 보이는 것으로 나타났고, 부도심방향의 경우는 최대 교통류율이 $1,300pc/h$ 정도일 때 임계속도가 $25km/h$ 정도를 보이는 것으로 나타나 도심방향과 부도심방향의 최대 교통류율 상태일 때 임계속도는 약 $5km/h$ 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 도심방향과 부도심방향의 도로의 기하구조 특성 및 차량 이용자의 통행특성에 따른 차이로 인해서 최대 교통류율과 임계속도가 차이를 보이는 것으로 판단되었다(Fig. 3.8 및 Fig. 3.9 참조).

또한 요일별 전체차로 평균 최대 교통류율을 살펴보면, 도심방향의 경우 $1,638\sim1,874pc/h$ 로 요일별에 있어서 약 $250pc/h$ 정도 차이를 보이고 있는 것으로 나타났고, 부도심방향의 경우 $1,142\sim1,428pc/h$ 로 요일별에 있어서 약 $300pc/h$ 정도의 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다(Table 3.4 및 Table 3.5 참조).

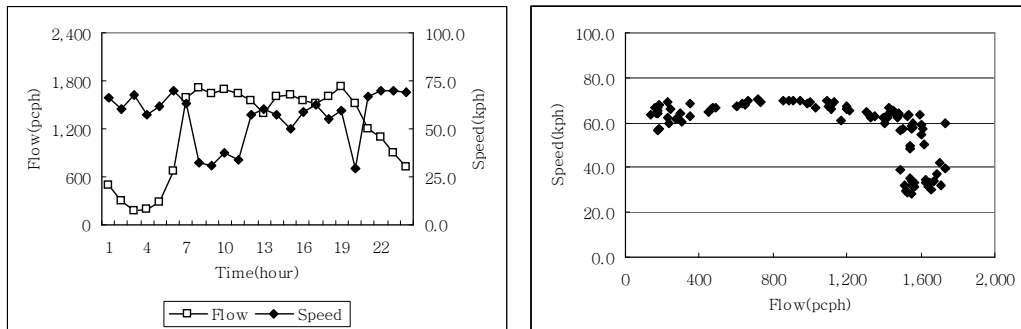
따라서 교통류율과 속도의 상호관계로부터 도심방향과 부도심방향에 대한 최대 교통류율과 최대 교통류율 일 때의 속도에 있어서 상당한 차이가 있는 것을 확인할 수 있었고, 교통류율과 속도사이에는 포물선 형태와 같은 비선형 관계가 존재한다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Monday

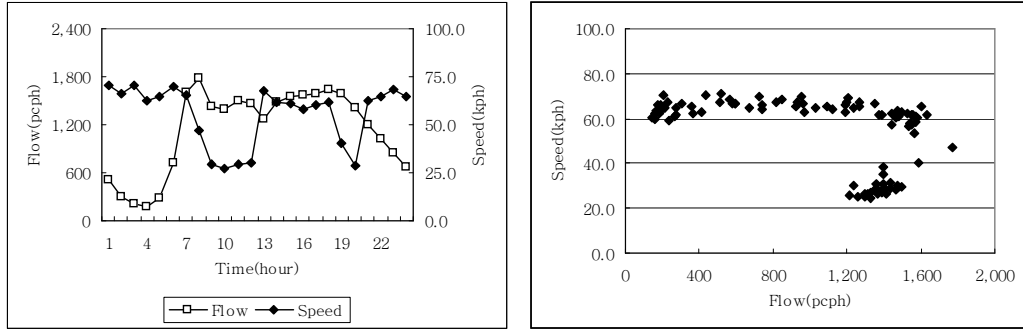


(b) Tuesday

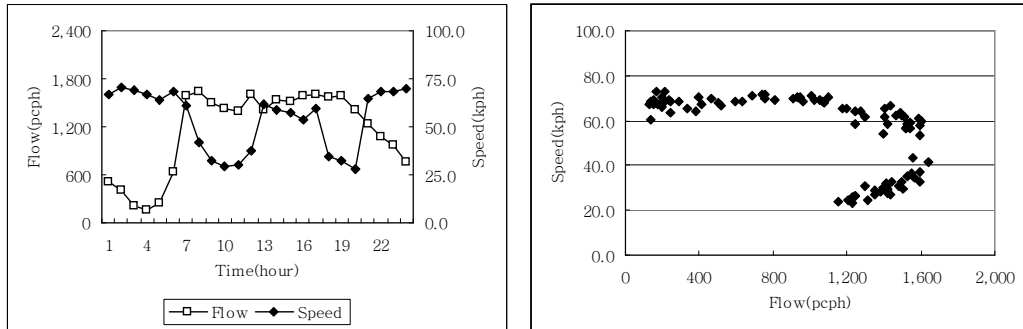


(c) Wednesday

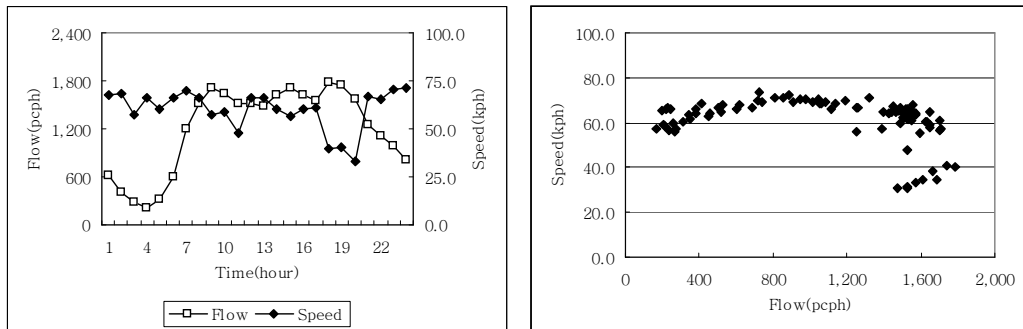
Fig. 3.8 Flow–speed relationships at the inbound(continued)



(d) Thursday

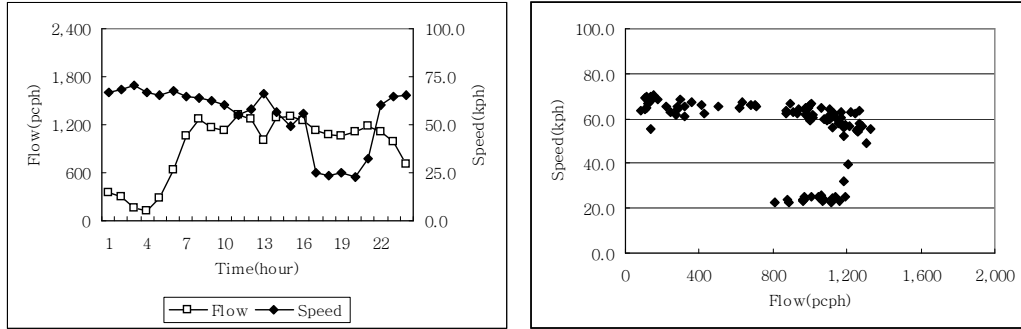


(e) Friday

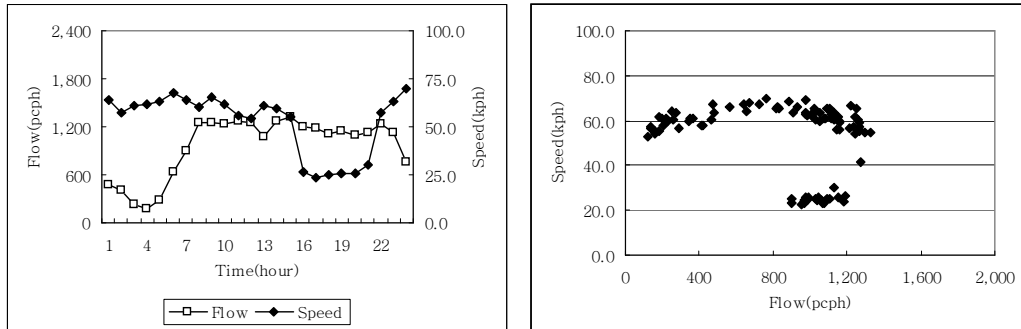


(f) Saturday

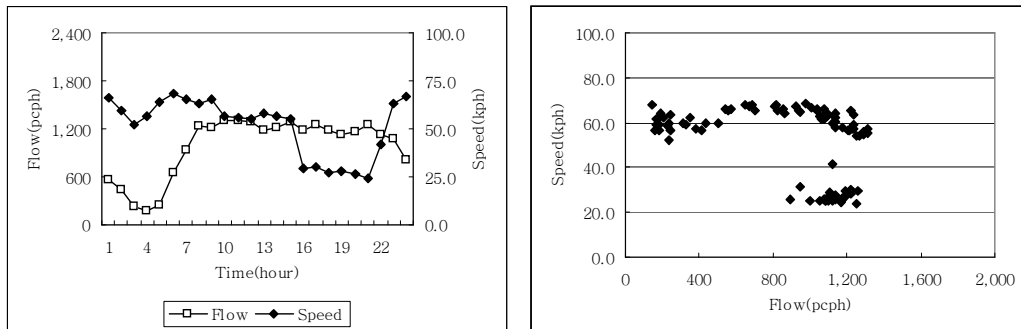
Fig. 3.8 Flow–speed relationships at the inbound



(a) Monday

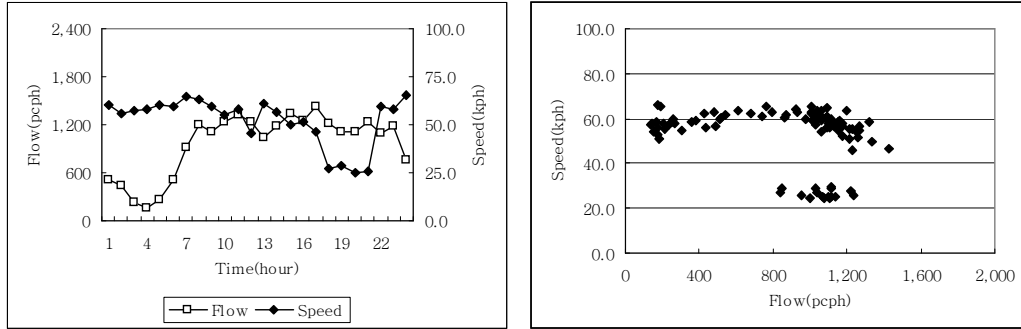


(b) Tuesday

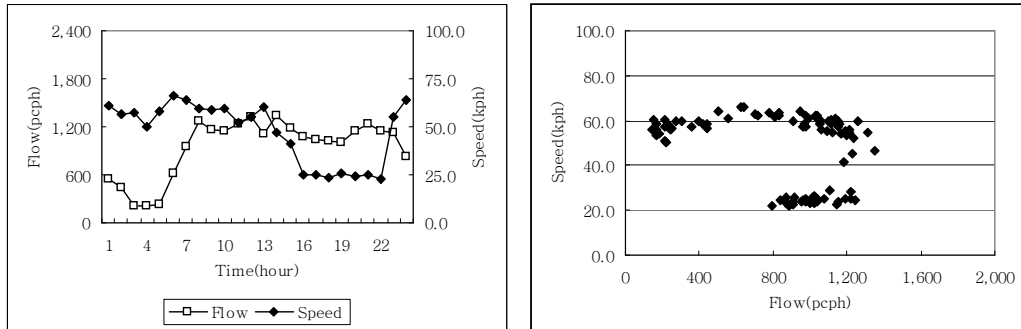


(c) Wednesday

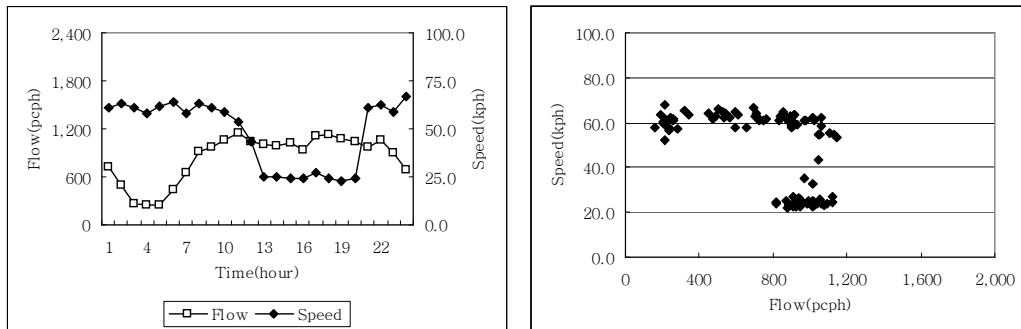
Fig. 3.9 Flow-speed relationships at the outbound(continued)



(d) Thursday



(e) Friday



(f) Saturday

Fig. 3.9 Flow–speed relationships at the outbound

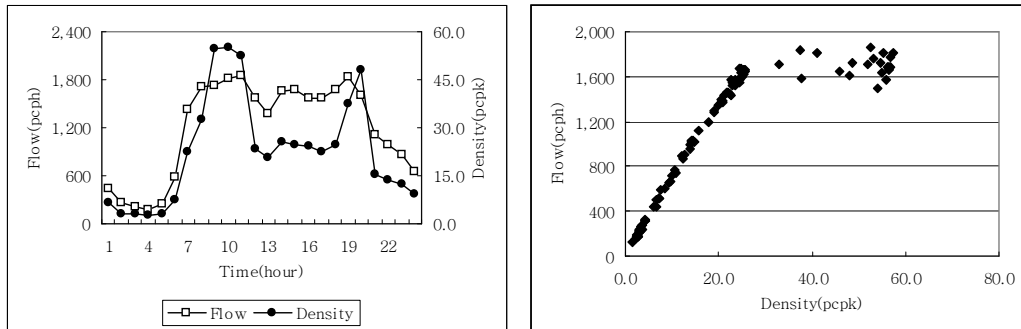
3.3.2 교통류율-밀도 관계

이 연구대상 도시고속도로 본선구간상의 교통류율과 밀도 관계 분석결과를 도심방향과 부도심방향기준으로 구분하여 요일별 시간대별 분포와 산점도를 이용하여 살펴본 결과 다음과 같았다.

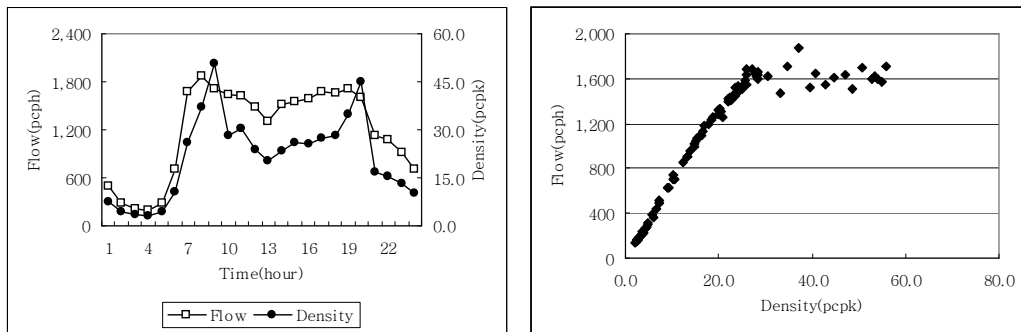
밀도는 교통류율의 증가와 함께 점점 증가하여 최대 교통류율 상태에서 임계 밀도에 도달하게 되는데 최대 교통류율 상태일 때 도심방향과 부도심방향의 임계밀도를 비교해 보면, 도심방향의 경우 최대 교통류율이 $1,800pc/h$ 정도일 때 임계밀도가 $50pc/km$ 정도를 보이는 것으로 나타났고, 부도심방향의 경우는 최대 교통류율이 $1,300pc/h$ 정도일 때 임계밀도가 $45pc/km$ 정도를 보이는 것으로 나타나 도심방향과 부도심방향의 최대 교통류율 상태일 때 임계밀도는 약 $5pc/km$ 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 3.10 및 Fig. 3.11 참조).

또한 요일별로 전체차로 평균 최대 밀도를 살펴보면, 도심방향의 경우 $47.61\sim55.30pc/km$ 로 요일별에 있어서 약 $8pc/km$ 정도 차이를 보이고 있는 것으로 나타났고, 부도심방향의 경우 $46.68\sim52.42pc/km$ 로 요일별에 있어서 약 $6pc/km$ 정도의 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다(Table 3.6 및 Table 3.7 참조).

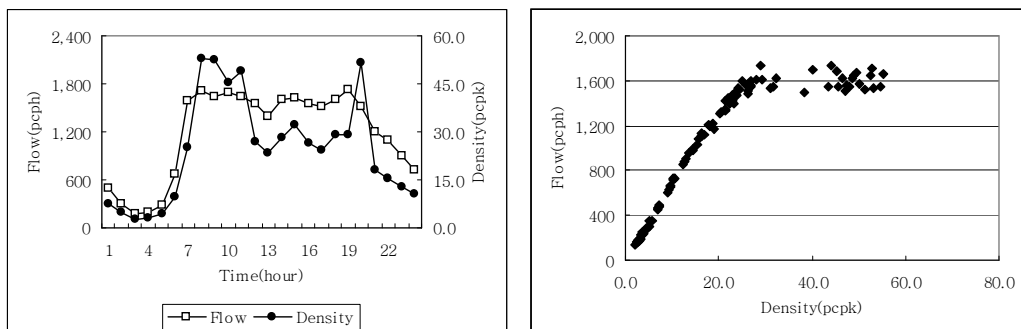
따라서 교통류율과 밀도의 상호관계로부터 도심방향과 부도심방향에 대한 최대 교통류율과 최대 교통류율 일 때의 밀도에 있어서 상당한 차이가 있는 것을 확인 할 수 있었고, 교통류율과 밀도사이에는 포물선 형태와 같은 비선형 관계가 존재한다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Monday

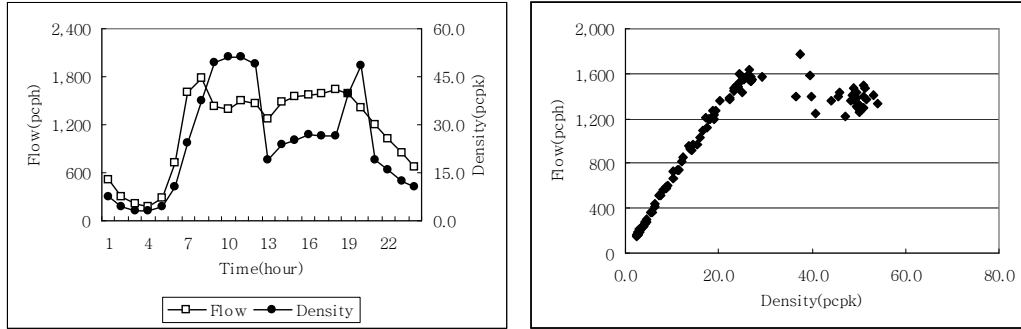


(b) Tuesday

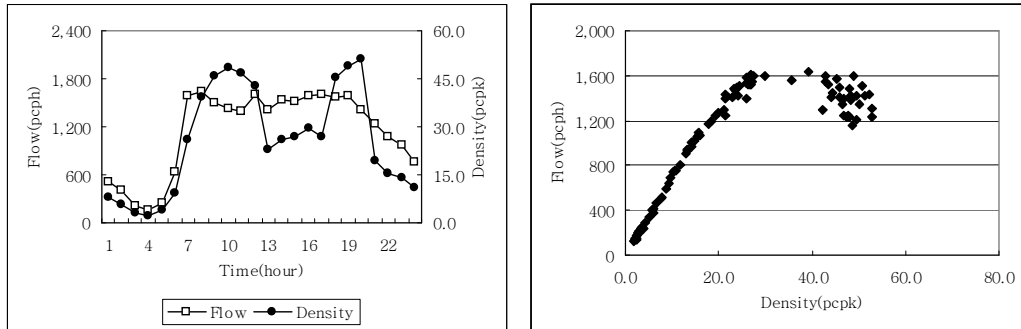


(c) Wednesday

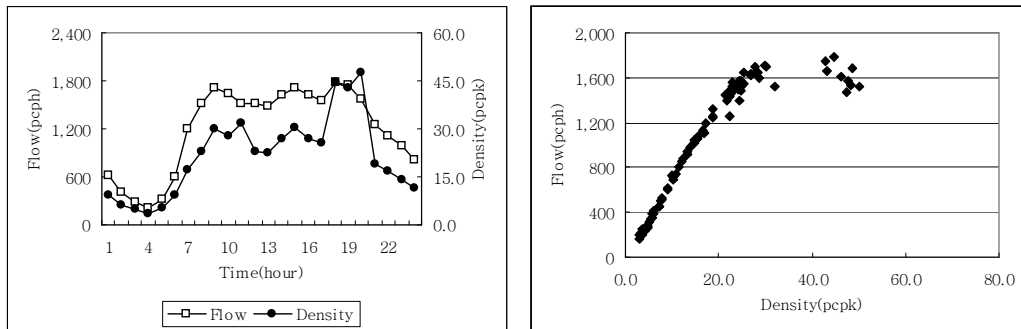
Fig. 3.10 Flow-density relationships at the inbound(continued)



(d) Thursday

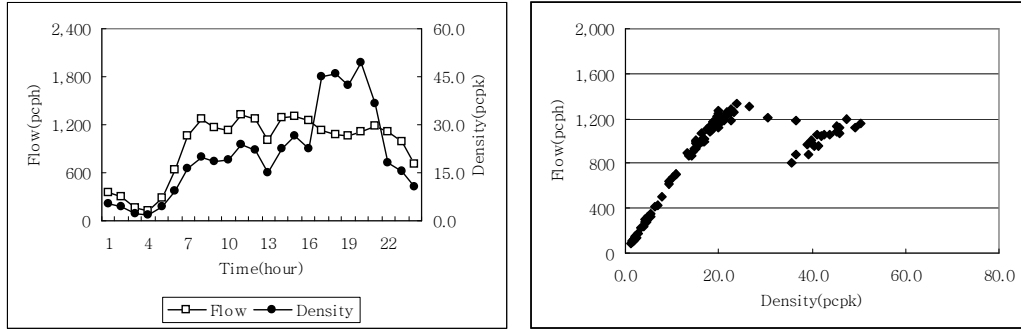


(e) Friday

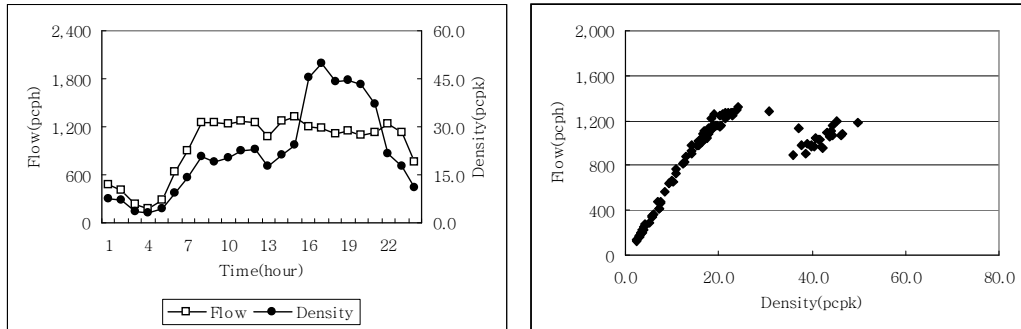


(f) Saturday

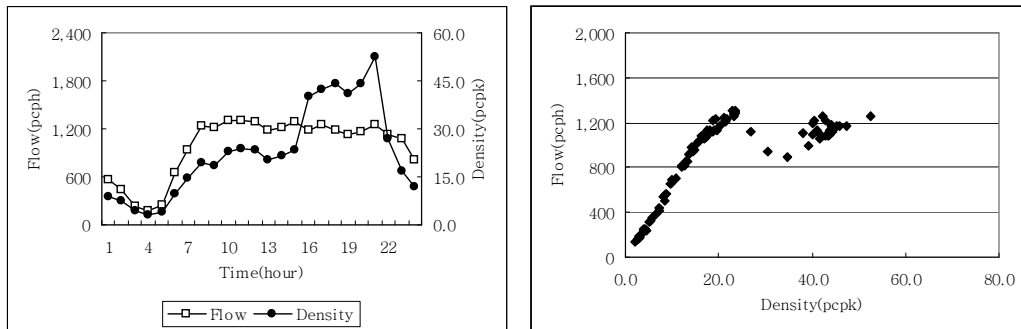
Fig. 3.10 Flow–density relationships at the inbound



(a) Monday

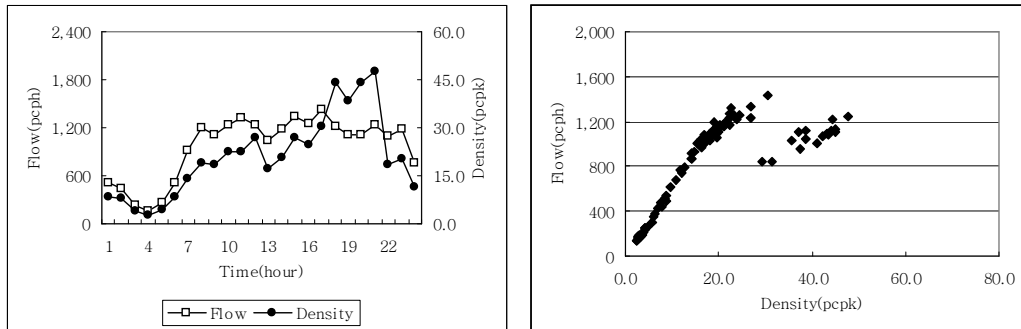


(b) Tuesday

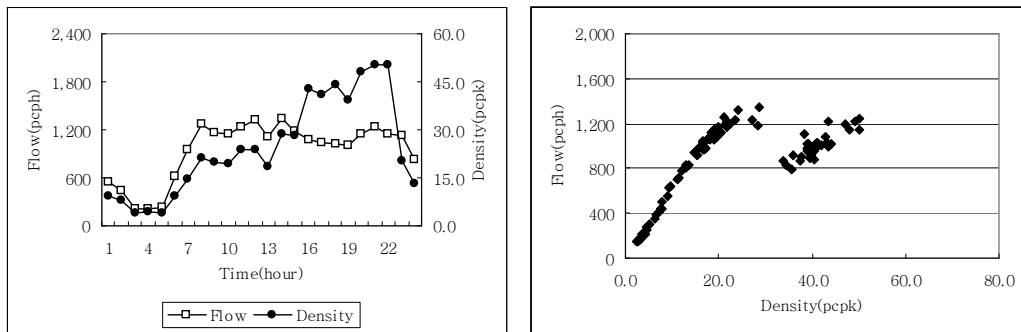


(c) Wednesday

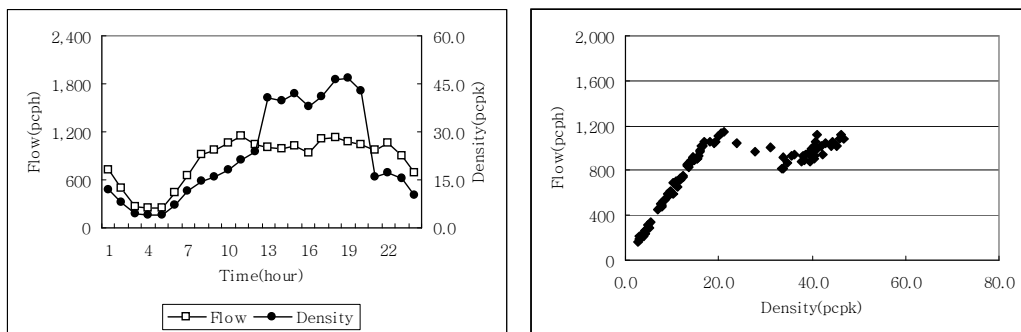
Fig. 3.11 Flow-density relationships at the outbound(continued)



(d) Thursday



(e) Friday



(f) Saturday

Fig. 3.11 Flow–density relationships at the outbound

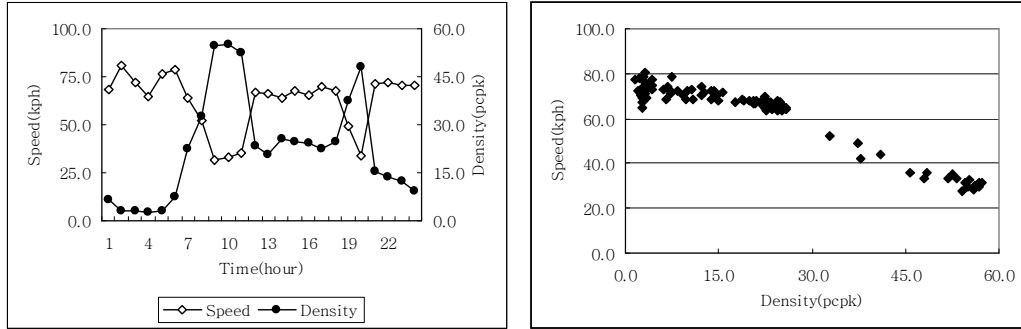
3.3.3 속도-밀도 관계

이 연구대상 도시고속도로 본선구간상의 속도와 밀도 관계 분석결과를 도심방향과 부도심방향기준으로 구분하여 요일별 시간대별 분포와 산점도를 이용하여 살펴본 결과 다음과 같았다.

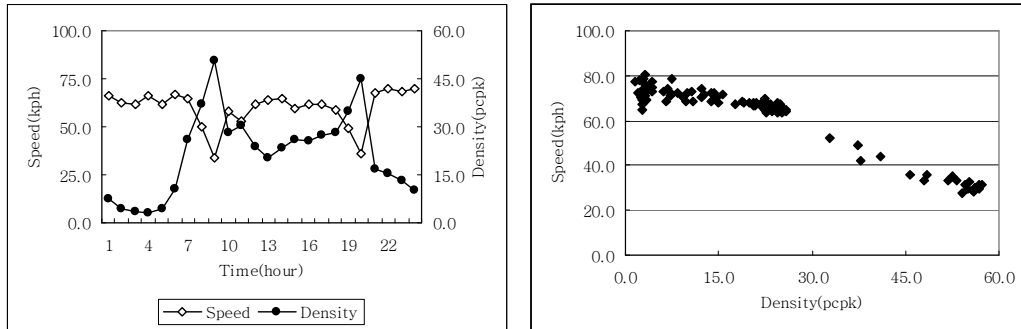
속도는 밀도의 증가와 함께 점점 감소하여 최대 교통류율 상태에서 임계속도와 임계밀도에 도달하게 되는데 최대 교통류율 상태일 때 도심방향과 부도심방향의 임계속도와 임계밀도를 비교해 보면, 도심방향의 경우 최대 교통류율이 $1,800pc/h$ 정도일 때 임계속도가 $30km/h$ 정도, 임계밀도가 $50pc/km$ 정도를 보이는 것으로 나타났고, 부도심방향의 경우는 최대 교통류율이 $1,300pc/h$ 정도일 때 임계속도가 $25km/h$ 정도, 임계밀도가 $45pc/km$ 정도를 보이는 것으로 나타나 도심방향과 부도심방향의 최대 교통류율 상태일 때 임계속도와 임계밀도가 각각 약 $5km/h$, $5pc/km$ 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 3.12 및 Fig. 3.13 참조).

또한 요일별로 전체차로 평균 최대속도일 때의 밀도와 최저속도일 때의 밀도를 살펴보면, 도심방향의 경우 최대속도가 $69.96\sim80.78km/h$ 일 때 밀도가 $2.29\sim3.33pc/km$, 최저속도가 $27.22\sim33.58km/h$ 일 때 밀도가 $47.61\sim55.30pc/km$ 로 나타났고, 부도심방향의 경우 최대속도가 $65.05\sim70.34km/h$ 일 때 밀도가 $1.83\sim3.90pc/km$, 최저속도가 $22.65\sim25.29km/h$ 일 때 밀도가 $46.68\sim52.42pc/km$ 로 나타나 도심방향과 부도심방향의 모든 지점에서 최대속도일 때는 밀도가 낮게 나타났고, 최저 속도일 때는 밀도가 높게 나타났다(Table 3.8 및 Table 3.9 참조).

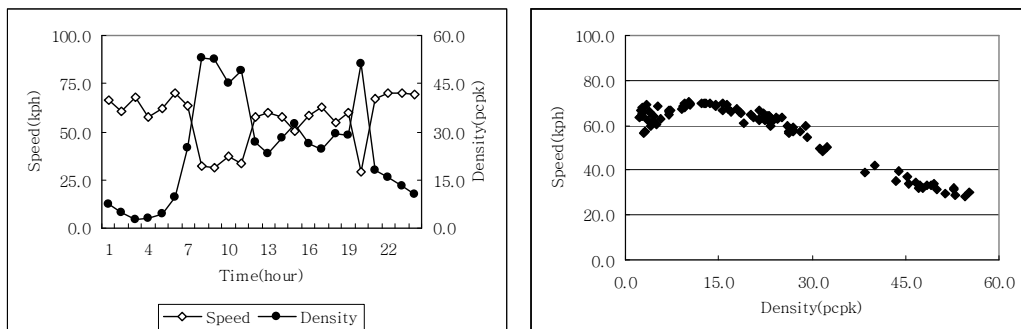
따라서 속도와 밀도의 상호관계로부터 도심방향과 부도심방향에 대한 최대 교통류율 일 때 속도와 밀도 사이에 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있었고, 속도와 밀도 사이에는 서로 반비례 관계가 존재한다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Monday

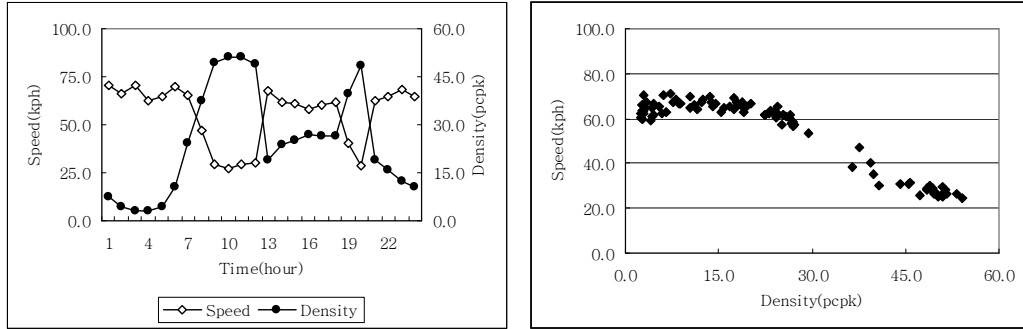


(b) Tuesday

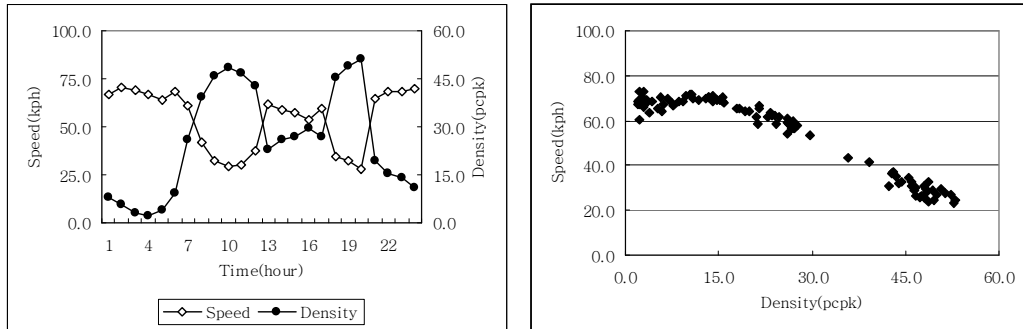


(c) Wednesday

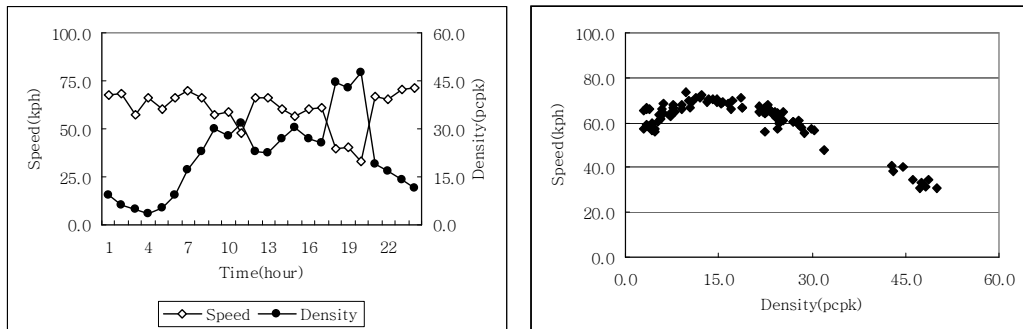
Fig. 3.12 Speed–density relationships at the inbound(continued)



(d) Thursday

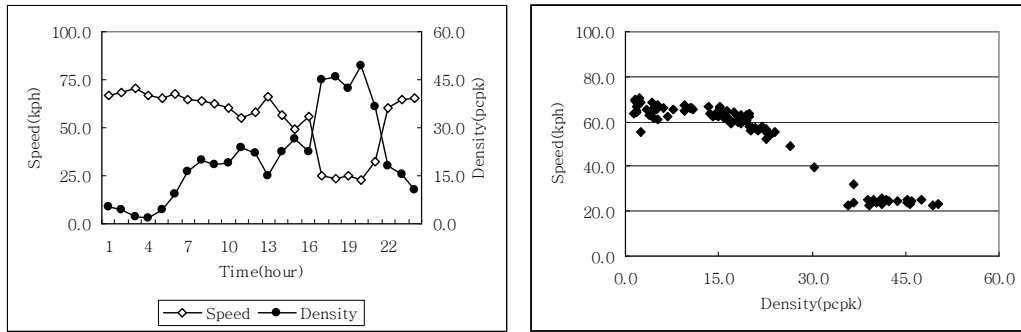


(e) Friday

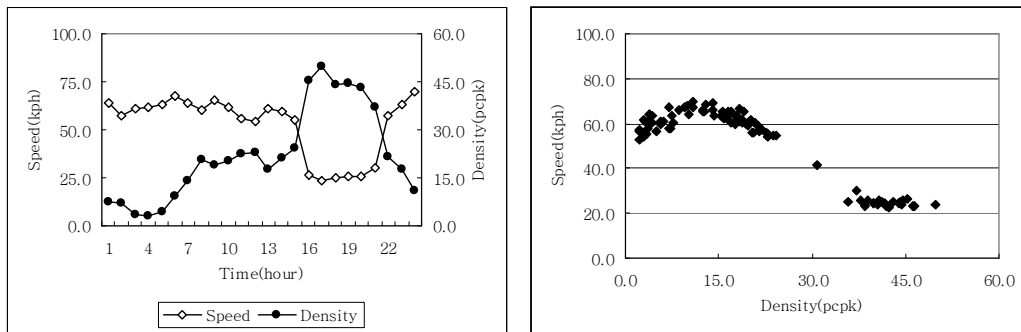


(f) Saturday

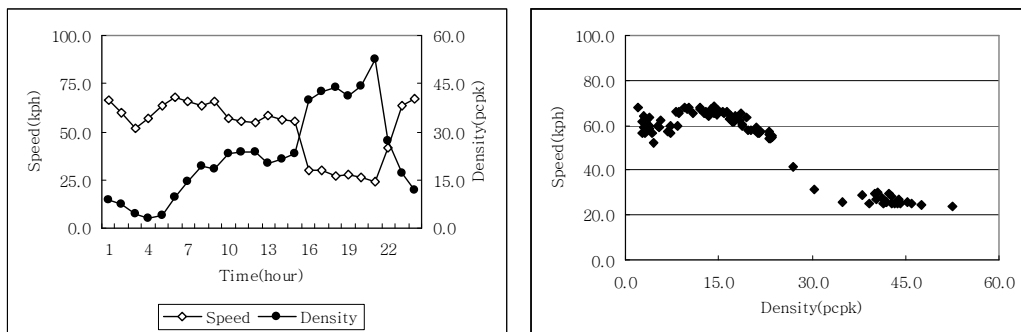
Fig. 3.12 Speed–density relationships at the inbound



(a) Monday

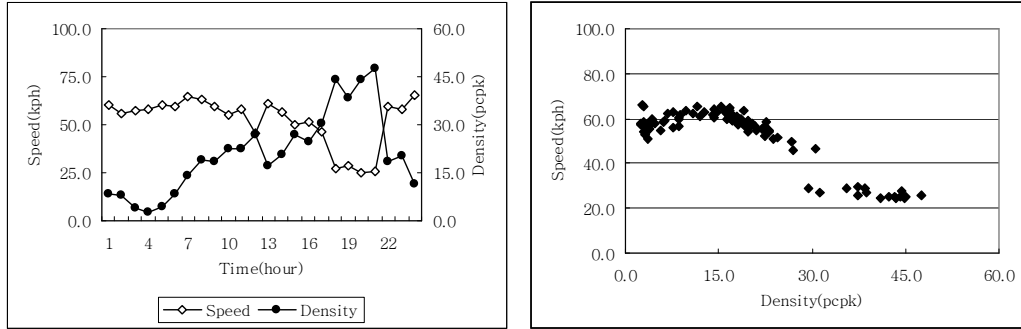


(b) Tuesday

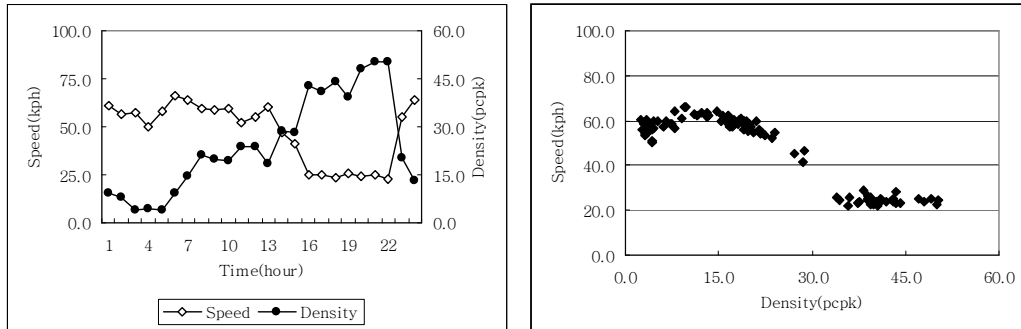


(c) Wednesday

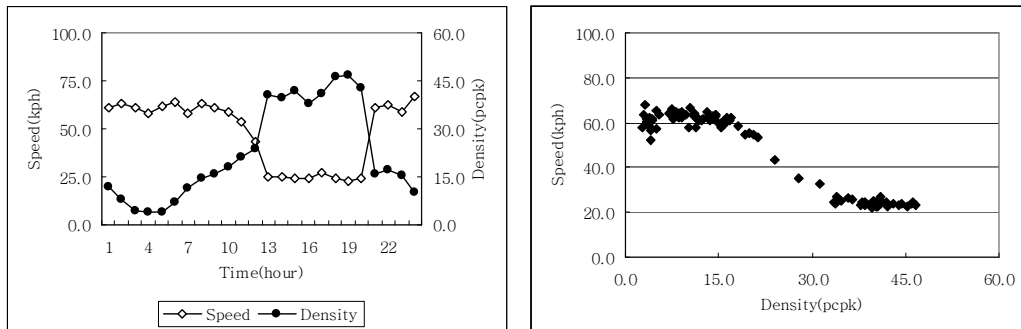
Fig. 3.13 Speed–density relationships at the outbound(continued)



(d) Thursday



(e) Friday



(f) Saturday

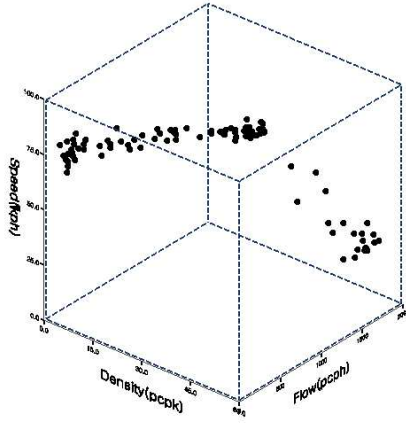
Fig. 3.13 Speed–density relationships at the outbound

3.3.4 교통류율-속도-밀도 관계

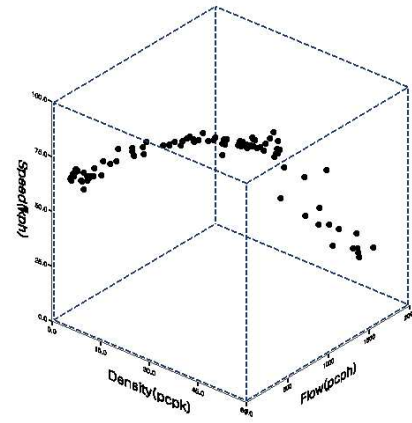
이 연구대상 도시고속도로 본선구간상의 교통류율, 속도, 밀도 관계 분석결과를 도심방향과 부도심방향기준으로 구분하여 3차원 산점도와 행렬을 이용하여 살펴본 결과 다음과 같았다.

도심방향과 부도심방향 모든 지점에서 교통류율이 증가하면 밀도는 증가하고 속도는 감소하는 것으로 나타났고, 교통류율이 감소하면 밀도는 감소하고 속도는 증가하는 것으로 나타나 교통류율, 속도, 밀도사이에는 상호 밀접한 선형 또는 비선형의 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

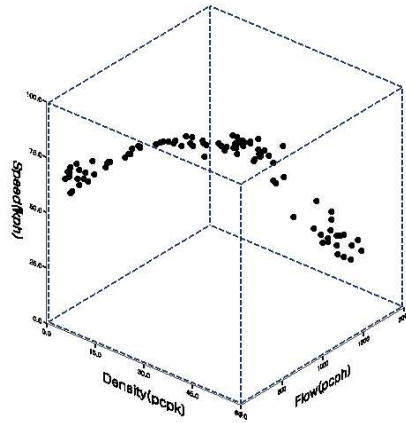
특히, 최대 교통류율의 경우 도심방향은 $1,800pc/h$ 정도를 보이는 것으로 나타난 반면에 부도심방향은 $1,300pc/h$ 정도를 보이는 것으로 나타났고, 최대 교통류율 일 때 임계속도와 임계밀도의 경우 도심방향은 각각 $30km/h$ 와 $50pc/km$ 정도를 보이는 것으로 나타난 반면에 부도심방향은 각각 $25km/h$ 와 $45pc/km$ 정도를 보이는 것으로 나타나 도심과 부도심지역의 방향별에 있어서 최대 교통류율과 최대 교통류율 일 때 임계속도와 임계밀도가 상당한 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 3.14 및 Fig. 3.15, Appendix A. 참조).



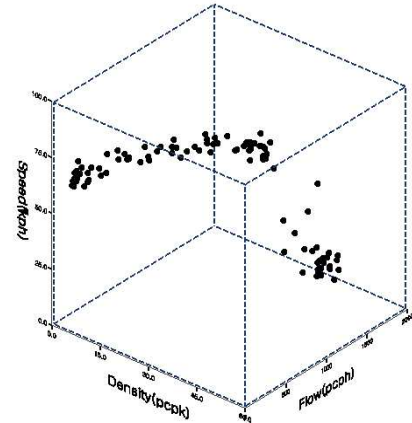
(a) Monday



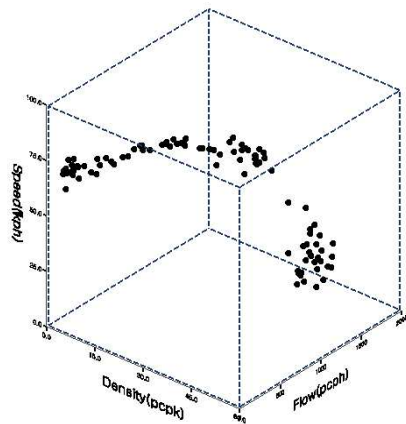
(b) Tuesday



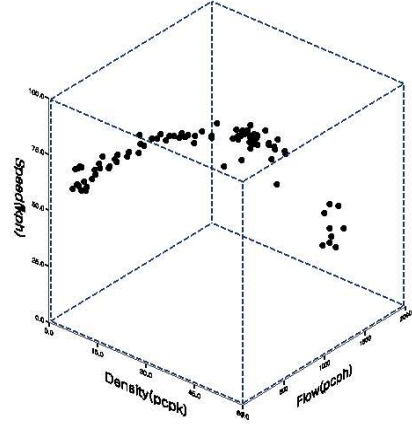
(c) Wednesday



(d) Thursday

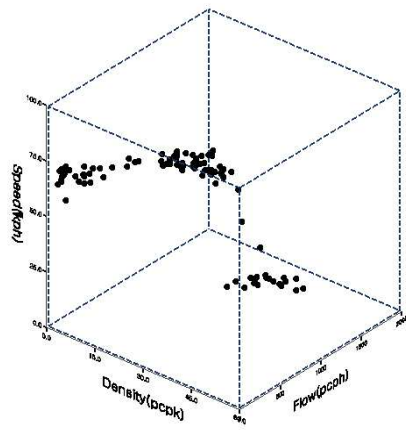


(e) Friday

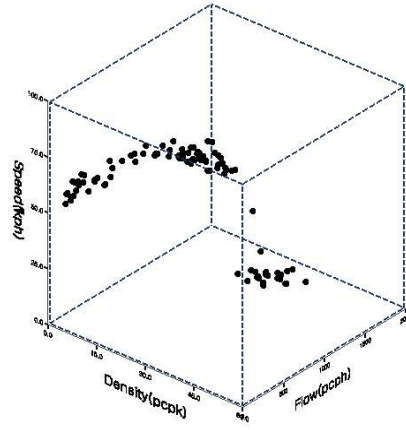


(f) Saturday

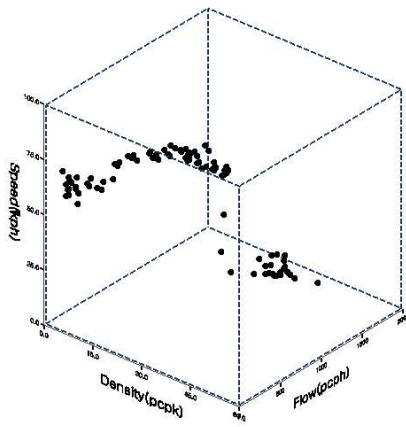
Fig. 3.14 3D-distribution at the inbound



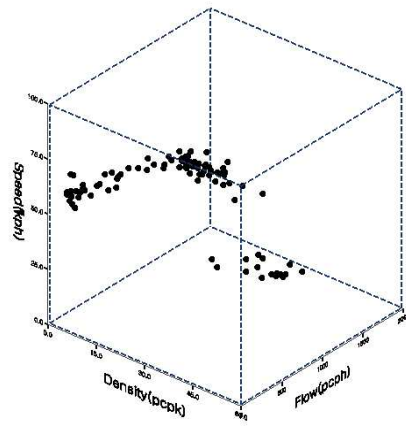
(a) Monday



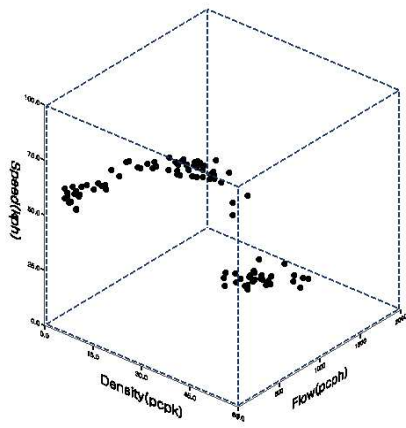
(b) Tuesday



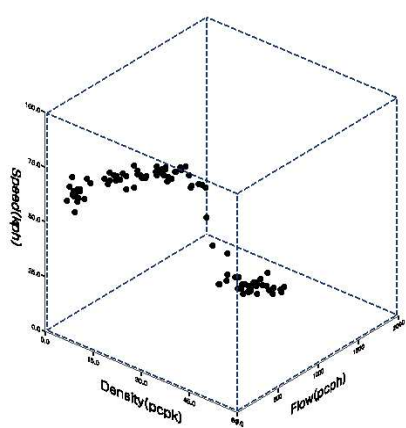
(c) Wednesday



(d) Thursday



(e) Friday



(f) Saturday

Fig. 3.15 3D-distribution at the outbound

제 4 장 혼잡통행료 모형구축 및 추정

4.1 혼잡통행료 이론 및 산정함수 도출

4.1.1 혼잡통행료 이론

다음의 Fig. 4.1은 혼잡통행료의 추정 원리를 설명한 것으로 $D(q)$ 는 특정 도로구간의 통행자 수요곡선이고, $AC(q)$ 는 특정 도로구간의 통행자 평균비용 (average cost, AC)곡선으로 전체비용을 통행차량대수로 나눈 것이며, $MC(q)$ 는 특정 도로구간의 사회적 한계비용(marginal cost, MC)곡선으로 통행차량 한대가 늘어났을 때 추가적으로 발생하는 전체비용의 증가분을 말한다.

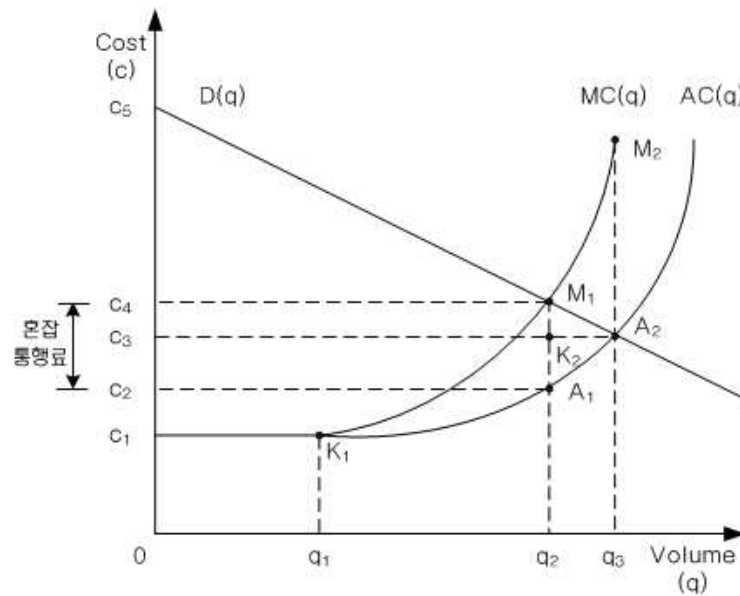


Fig. 4.1 Estimation principle of congestion toll

우선 교통혼잡이 발생하지 않는 $(0 - q_1)$ 구간의 경우 모든 도로이용자들은 최적의 주행속도로 통행할 수 있으므로 차량 한 대당 통행비용은 거의 동일하다.

그러나 교통수요가 증가하여 교통량 q_1 을 초과하게 되면 교통혼잡이 발생하게 되어 사회적 한계비용은 도로이용자 개인이 부담하는 평균비용을 초과하게 되므로 외부불경제가 발생하게 된다. 이 때 도로이용에 대한 비용을 부과하지 않으면 교통수요는 수요곡선 $D(q)$ 와 평균비용곡선 $AC(q)$ 가 만나는 A_2 지점에서 결정되고, 교통량은 q_3 지점에서 결정된다. 이 경우 통행자들의 편익은 $c_3 \cdot A_2 \cdot c_5$ 을 둘러싼 영역만큼이 되지만 혼잡으로 인한 사회적 손실비용이 $M_1 \cdot A_2 \cdot M_2$ 을 둘러싼 영역만큼 발생하게 되므로 총 사회적 편익이 감소하게 된다.

사회적 관점에서 바람직한 균형점은 수요곡선 $D(q)$ 와 한계비용곡선 $MC(q)$ 가 만나는 M_1 지점으로 이 때 교통량 q_2 는 수요와 공급으로 결정되는 q_3 보다 작게 된다. 따라서 정부는 혼잡악화로 인한 외부불경제를 막기 위해서는 한계비용과 평균비용의 차인 $(M_1 - A_1)$ 만큼의 혼잡통행료를 징수함으로써 도로이용자의 평균비용을 높임과 동시에 교통수요의 감소효과로 인한 사회적 한계비용을 낮춤으로써 적정교통량을 유지할 수 있게 된다. 이 경우 통행자들의 편익은 $c_4 \cdot M_1 \cdot c_5$ 을 둘러싼 영역으로 혼잡통행료 부과 전에 비해 $c_3 \cdot A_2 \cdot M_1 \cdot c_4$ 을 둘러싼 영역만큼 감소하지만, 이는 사회 전체의 후생 관점에서 보면 사라진 것이 아니라 정부가 혼잡통행료의 형태로 거둬들인 수입금 $c_2 \cdot A_1 \cdot M_1 \cdot c_4$ 을 둘러싼 영역에 이전된 것에 불과하다. 따라서 사회적 손실비용 $M_1 \cdot A_2 \cdot M_2$ 는 교통량을 인위적으로 q_3 에서 q_2 로 감소시킴으로써 발생하지 않게 되므로 총사회적 편익은 극대화된다.

4.1.2 혼잡통행료 산정함수 도출

1) 속도탄력성을 고려한 혼잡통행료 산정함수 도출

Walters(1961)는 평균비용곡선이 통행시간과 비례하여 증가한다는 가정 하에 비용의 추정이 가능하다고 하였으며, 이를 수식으로 나타내면 다음의 식(4.1.1)과 식(4.1.2)와 같다.

$$AC(q) = c \times \left(\frac{d}{u} \right) = \left(\frac{c}{u} \right) \quad (4.1.1)$$

$$TC(q) = q \cdot \frac{c}{u} \quad (4.1.2)$$

여기서,

$AC(q)$: 평균비용(average cost, AC)

$TC(q)$: 전체비용(total cost, TC)

q : 단위시간동안 도로를 통과하는 차량대수(veh/h)

u : 차량속도(km/h)

d : 운행거리(km), ($d=1km$ 로 가정)

c : 일반화비용, (차량운행비용+시간비용)

q 는 단위시간동안 도로를 통과하는 차량대수이고, u 는 도로상의 차량속도로 차량속도 u 는 q 의 함수로서 $u=u(q)$ 로 나타낼 수 있으므로, 상기의 식(4.1.1)과 식(4.1.2)를 바탕으로 차량 한 대가 증가함에 따라 발생하는 전체비용의 증가분을 의미하는 한계비용(marginal cost, MC)을 수식으로 나타내면 다음의 식(4.1.3)과 같다.

$$MC(q) = \frac{dTC(q)}{dq} = \frac{cu - qc(du/dq)}{u^2} = AC(q) - \frac{qc}{u^2} \left(\frac{du}{dq} \right) \quad (4.1.3)$$

혼잡통행료를 부과하는 도로의 최적 교통량은 Fig. 4.1 혼잡통행료의 추정 원리에서 살펴보았듯이 수요곡선 $D(q)$ 와 한계비용곡선 $MC(q)$ 가 만나는 균형점에서 결정되므로 혼잡통행료는 이 균형점에서 한계비용과 평균비용의 차이만큼 부과할 수 있으며, 이를 수식으로 나타내면 다음의 식(4.1.4)와 같다.

$$r = MC(q) - AC(q) = -\frac{qc}{u^2} \left(\frac{du}{dq} \right) \geq 0 \quad (4.1.4)$$

여기서,

r : 혼잡통행료

식(4.1.4)에 의한 한계비용과 평균비용의 차이는 양(+)의 부호를 가지며, 교통량과 속도관계는 최대 교통류율 상태 이전($dq/du \leq 0$)의 경우 교통량이 증가함에 따라 속도가 점차 감소하지만, 최대 교통류율 상태 이후($dq/du > 0$)의 경우 교통량이 추가로 증가함에 따라 속도가 점차 감소하므로 후굴곡선(backward bending)의 형태를 가지게 되며, 평균비용곡선 또한 교통수요가 도로의 용량을 초과하게 되면 후굴곡선의 속성을 가지게 된다. 따라서 최대 교통류율 상태 이후 지점과 교통수요가 도로의 용량을 초과하는 지점에서는 상기의 식(4.1.4)을 적용할 수 없게 되므로 이 연구에서는 수요곡선 $D(q)$ 가 한계비용곡선 $MC(q)$ 와 교차하고, 평균비용곡선 $AC(q)$ 가 증가하는 부분을 혼잡통행료의 적용이 가능한 범위로 한정하였는데, 이는 교통량과 속도관계가 후굴곡선의 형태를 가지게 되므로 최대 교통류율 상태(즉, 과포화상태)에서는 혼잡통행료가 상당히 높게 책정되어 혼잡통행료 부과정책의 실현가능성이 낮을 수 있지만, Verhoef et al(1995)은 과포화상태에서 적은 액수의 혼잡통행료를 부과하더라도 개별 통행당 통행비용이 증가를 하므로 더 많은 교통량을 일정시간동안 처리할 수 있어서 사회적 비용이 감소한다고 주장하였기 때문이다.

상기의 개념을 바탕으로 교통류모형의 교통량, 속도, 밀도 간 상호관계 식인 $q = u \cdot k$ 을 이용하여 교통량의 속도탄력성을 추정하면 다음의 식(4.1.5)과 같고, 식(4.1.5)를 식(4.1.4)에 대입하면 다음의 식(4.1.6)과 같은 혼잡통행료 산정함수를 구할 수 있다.

$$\epsilon_u^q = \frac{dq/q}{du/u} = \frac{u}{q} \cdot \frac{dq}{du} \quad (4.1.5)$$

$$r = -\frac{c}{u} \cdot \frac{q}{u} \frac{du}{dq} = -\frac{c}{u} \cdot \frac{1}{\epsilon_u^q} \quad (4.1.6)$$

또한 $k = k(u)$ 라고 가정하고 교통류모형의 상호관계 식인 $q = u \cdot k$ 를 이용하여

밀도의 속도탄력성을 추정하면 다음의 식(4.1.8)과 같이 나타낼 수 있으므로 교통량의 속도탄력성(ϵ_u^q)은 밀도의 속도탄력성(ϵ_u^k)으로도 표현 할 수 있으며, 이를 이용하여 다음의 식(4.1.9)와 같은 혼잡통행료 산정함수를 구할 수 있다.

$$\frac{dq}{du} = k + u \frac{dk}{du} \quad (4.1.7)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_u^q &= \frac{dq/q}{du/u} = \frac{u}{q} \cdot \frac{dq}{du} = \frac{1}{k} \cdot \frac{dq}{du} = \frac{1}{k} \left(k + u \frac{dk}{du} \right) \\ &= 1 + \frac{u}{k} \cdot \frac{dk}{du} = 1 + \epsilon_u^k \end{aligned} \quad (4.1.8)$$

$$r = -\frac{c}{u} \cdot \frac{q}{u} \frac{du}{dq} = -\frac{c}{u} \cdot \frac{1}{1 + \epsilon_u^k} \quad (4.1.9)$$

2) 교통류모형을 고려한 혼잡통행료 산정함수 도출

한계비용과 평균비용의 차이를 이용하여 혼잡통행료를 부과하려할 때는 혼잡통행료 부과대상 도로에 대한 정확한 수요함수가 구축되어야 하나, 교통류모형과 같은 공학적 방법론을 기반으로 한 혼잡통행료 산출방법은 수요함수의 정확한 규명 없이도 혼잡통행료를 산출할 수 있는 장점이 있다.

교통류모형과 같은 대표적인 공학적 방법으로는 교통량-속도 모형, 교통량-밀도 모형, 속도-밀도 모형의 함수관계를 이용하여 교통량-비용 함수관계를 산출하는 것으로 Greenshields형 모형(Greenshields, Drew, Pipes & Munjal 모형), Underwood형 모형(Underwood, Bell-shaped Drake et al. 모형), Greenberg 모형 등과 같은 단일구간모형과 Ellis 모형과 Edie 모형, 수정된 Greenberg 모형 등과 같은 다중구간모형 등이 있다.

각 모형에 대한 장·단점을 살펴보면 다음과 같다.

단일구간모형은 Greenshields 모형의 경우 직선모형(linear model)으로 식의 형태가 간단하다는 면에서는 적용이 용이하나 혼잡밀도(k_j)의 정확한 추정이 어렵고 실제 도로상에서 조사한 자료와 비교해 보면 단순히 직선 형태로 처리하기에는 어려움이 있다. 또한 Underwood 모형의 경우 지수모형(exponential

model)으로 밀도가 낮은 부분에서는 속도를 정확히 산출할 수 있지만, 밀도가 높은 부분에서는 속도가 부정확하게 산출되는 단점이 있는 반면에 Greenberg 모형의 경우 로그모형(logarithmic model)으로 밀도가 높은 부분에서 속도를 정확히 산출할 수 있는 장점이 있지만, 밀도가 낮은 부분에서는 속도가 부정확하게 산출된다. Drew($\beta = (n+1)/2$), Pipes & Munjal($\beta = n$), Drake et al.($\delta = n$) 모형의 경우 하나의 속도와 밀도관계 식을 이용한 모형으로 n 값에 따라 Greenshields($\beta = 1$), Underwood($\delta = 1$), Bell-shaped($\delta = 2$) 모형 등과 같은 다양한 모형이 구축 가능한 모형으로 하나의 속도와 밀도관계 식으로 선형과 비선형의 관계를 설명할 수 있으므로 실제 도로상에서 조사한 자료와 비교해 보면 단일구간모형 중 현실묘사성이 가장 뛰어난 모형이다.

다중구간모형은 Greenshields, Underwood, Greenberg 모형의 장점을 살리고 단점을 개선한 모형으로 Ellis 모형의 경우 관측자료 영역을 2중구간과 3중구간으로 구분하여 비선형 관계를 간단한 선형관계로 제시하였고, Edie 모형의 경우 밀도가 낮고 높은 교통류 상태를 동시에 표현하기 위하여 Underwood 모형과 Greenberg 모형을 통합하여 속도와 밀도관계를 현실적으로 묘사하고자 하였다. 그러나 다중구간모형은 관측자료 영역 간 경계의 불연속성이 존재하여 용량 확인 과정이 복잡하고 여러 개의 용량 값이 발생할 수 있는 단점이 있다.

따라서 이 연구에서는 다중구간모형의 단점을 극복하고자 하나의 속도와 밀도관계 식으로 다양한 모형구축이 가능하고 실제 도로상의 관측 자료에 대해서 현실묘사성이 뛰어난 단일구간모형(Greenshields형 모형, Underwood형 모형, Greenberg 모형)을 이용하여 혼잡통행료 산정함수를 도출하였다.

다음의 Table 4.1은 Greenshields형 모형, Underwood형 모형, Greenberg 모형에 대한 속도-밀도 모형의 함수관계를 이용하여 교통량-속도 모형의 함수관계를 나타낸 것이고, Table 4.2는 매개변수(parameter) 관계를 바탕으로 Greenshields형 모형, Underwood형 모형, Greenberg 모형에 대한 속도-밀도 모형의 함수관계를 이용하여 교통량-속도 모형의 함수관계를 재정리한 것이다(Appendix A 참조).

Table 4.1 Speed-density and flow-speed function relationships

Model	Speed-density function	Flow-speed function
Greenshields type model	$k = k_j \left(1 - \frac{u}{u_f}\right)^{\frac{1}{\beta}}, (\beta > 0)$	$q = u \cdot k_j \left(1 - \frac{u}{u_f}\right)^{\frac{1}{\beta}}$
Underwood type model	$k = k_m \left(\delta \ln \frac{u_f}{u}\right)^{\frac{1}{\delta}}, (\delta > 0)$	$q = u \cdot k_m \left(\delta \ln \frac{u_f}{u}\right)^{\frac{1}{\delta}}$
Greenberg model	$k = k_j \exp\left(-\frac{u}{u_m}\right)$	$q = u \cdot k_j \exp\left(-\frac{u}{u_m}\right)$

Table 4.2 Re-specifications of speed-density and flow-speed function relationships

Model	Parameter relationships	Speed-density function	Flow-speed function
Greenshields type model	$k_j = (1 + \beta)^{1/\beta} \cdot k_m,$ $u_f = (1 + \beta)/\beta \cdot u_m,$ $\beta = u_m/(u_f - u_m)$	$k = k_m \left(1 + \beta - \beta \frac{u}{u_m}\right)^{1/\beta}$ $= k_m \left(\frac{u_f - u}{u_f - u_m}\right)^{1/\beta}$	$q = q_m \left(\frac{u}{u_m}\right) \left(1 + \beta - \beta \frac{u}{u_m}\right)^{1/\beta}$ $= q_m \left(\frac{u}{u_m}\right) \left(\frac{u_f - u}{u_f - u_m}\right)^{1/\beta}$
Underwood type model	$u_f = \exp(1/\delta) \cdot u_m,$ $\delta = 1/(\ln u_f - \ln u_m)$	$k = k_m \left(1 + \delta \ln \frac{u_m}{u}\right)^{1/\delta}$ $= k_m \left(\frac{\ln u_f - \ln u}{\ln u_f - \ln u_m}\right)^{1/\delta}$	$q = q_m \left(\frac{u}{u_m}\right) \left(1 + \delta \ln \frac{u_m}{u}\right)^{1/\delta}$ $= q_m \left(\frac{u}{u_m}\right) \left(\frac{\ln u_f - \ln u}{\ln u_f - \ln u_m}\right)^{1/\delta}$
Greenberg model	$k_j = \exp(1) \cdot k_m$	$k = k_m \exp\left(1 - \frac{u}{u_m}\right)$	$q = q_m \left(\frac{u}{u_m}\right) \exp\left(1 - \frac{u}{u_m}\right)$

다음의 Table 4.3은 Greenshields형 모형, Underwood형 모형, Greenberg 모형에 대한 교통량의 속도탄력성과 혼잡통행료 산정함수로 교통량의 속도탄력성은 식(4.1.5)를 이용하여 추정하였고, 혼잡통행료 산정함수는 식(4.1.6)을 이용하여 추정된 것으로 이 연구대상 도시고속도로의 혼잡통행료 추정 및 평가시 이용하였다(Appendix B 참조).

Table 4.3 Speed elasticity of flow and congestion toll computational function for flow–speed models

Model	Speed elasticity of flow	Congestion toll computational function
Greenshields type model	$\epsilon_u^q = \frac{u_m - u}{u_m - \frac{\beta}{1+\beta}u}$	$r = \frac{c}{u} \times \frac{u_m - \frac{\beta}{1+\beta}u}{u - u_m},$ $(u_m \leq u \leq \frac{1+\beta}{\beta}u_m)$
Underwood type model	$\epsilon_u^q = \frac{\delta(\ln u_m - \ln u)}{1 + \delta(\ln u_m - \ln u)}$ $= \frac{\delta \ln(u_m/u)}{1 + \delta \ln(u_m/u)}$	$r = \frac{c}{u} \times \frac{1 + \delta(\ln u_m - \ln u)}{\delta(\ln u - \ln u_m)},$ $= \frac{c}{u} \times \frac{\ln[u_m \exp(1/\delta)] - \ln u}{\ln u - \ln u_m}$ $(u_m \leq u \leq u_m \exp(1/\delta))$
Greenberg model	$\epsilon_u^q = \frac{u_m - u}{u_m}$	$r = \frac{c}{u} \times \frac{u_m}{u - u_m},$ $(0 \leq u_m \leq u)$

4.2 혼잡통행료 모형 구축 및 선정

교통류모형을 이용하여 혼잡통행료를 추정하기 위해서는 혼잡통행료 부과대상 도로에 대한 교통상황을 적절하게 묘사할 수 있는 교통류모형 구축이 선행되어야 한다.

따라서 이 연구에서는 연구대상 도로구간인 제1도시고속도로(번영로)내 도심방향과 부도심방향 본선구간상의 교통특성자료를 바탕으로 Greenshields형 모형, Underwood형 모형, Greenberg 모형을 이용하여 각 모형에 대한 교통량-속도 모형의 함수관계를 파악하기 위해서 속도-밀도 모형을 구축하였고, 모형에 대한 매개변수를 도출하였으며, 구축된 모형에 대해서 모형별 상호 비교·검토를 통해 혼잡통행료를 추정하기 위한 최적의 교통류모형을 선정하였다.

4.2.1 모형 구축방법

교통류의 대표적인 변수인 교통량, 속도, 밀도는 상호 유기적인 인과관계를 형성하기 때문에 모집단들의 관련성을 통계적으로 추정하기가 쉽지 않다.

따라서 이 연구에서는 독립변수(independent variable)가 종속변수(dependent variable)에 미치는 영향력의 크기를 수학적 관계식으로 추정하고 분석하는 통계적인 분석방법인 회귀분석(regression analysis)방법을 이용하여 모형을 구축하였으며, 독립변수는 전체차로의 평균밀도(k_T)를 이용하였고, 종속변수는 전체차로의 공간평균속도(u_T)를 이용하여 속도와 밀도사이의 관계를 선형 회귀모형식으로 유도하였다. 이를 함수관계로 표현하면 다음의 식(4.2.1)과 같다.

$$y = b_0 + b_1 \cdot x \quad (4.2.1)$$

여기서,

y : 종속변수(전체차로의 공간평균속도, u_T)

x : 독립변수(전체차로의 평균밀도, k_T)

b_0, b_1 : 상수(모형의 회귀계수)

이 연구에서는 속도와 밀도의 비선형관계를 선형관계로 유도하기 위해서 Greenshields형 모형, Underwood형 모형, Greenberg 모형을 상기의 식(4.2.1)과 같은 선형 회귀모형 식으로 유도하여 모형을 구축하였으며, 모형구축에 있어서 Greenshields형 모형의 β 값과 Underwood형 모형의 δ 값은 0~2.5사이에서 0.1씩 증가시켜 가면서 모형을 구축하였다.

1) Greenshields형 모형

Greenshields형 모형의 속도와 밀도관계를 나타내는 일반식은 다음의 식(4.2.2)와 같다.

$$u = u_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j} \right)^\beta \right] \quad (4.2.2)$$

여기서,

u : 공간평균속도(km/h)

u_f : 자유속도(km/h)

k : 평균밀도(pc/km)

k_j : 혼잡밀도(pc/km)

β : 실수(real number), ($\beta > 0$)

Greenshields형 모형의 일반식은 변수의 치환을 통해서 다음의 식(4.2.3)과 같은 선형 회귀모형 식으로 표현할 수 있고, 매개변수인 자유속도(u_f)와 혼잡밀도(k_j)는 모형의 회귀계수를 이용하여 $u_f = b_0$, $k_j = -(b_0/b_1)^{1/\beta}$ 로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= u_f - \frac{u_f}{k_j^\beta} k^\beta \\ &= b_0 + b_1 k_1 \end{aligned} \quad (4.2.3)$$

여기서,

$b_0 = u_f$: 모형의 회귀계수(km/h)

$b_1 = -\frac{u_f}{k_j^\beta}$: 모형의 회귀계수($km^2/pc \cdot h$)

$k_1 = k^\beta$

2) Underwood형 모형

Underwood형 모형의 속도와 밀도관계를 나타내는 일반식은 다음의 식(4.2.4)와 같다.

$$u = u_f \cdot \exp\left[-\frac{1}{\delta} \cdot \left(\frac{k}{k_m}\right)^\delta\right] \quad (4.2.4)$$

여기서,

u : 공간평균속도(km/h)

u_f : 자유속도(km/h)

k : 평균밀도(pc/km)

k_m : 임계밀도(pc/km)

δ : 실수(real number), ($\delta > 0$)

Underwood형 모형의 일반식은 변수의 치환을 통해서 다음의 식(4.2.5)와 같은 선형 회귀모형 식으로 표현할 수 있고, 매개변수인 자유속도(u_f)와 임계밀도(k_m)는 모형의 회귀계수를 이용하여 $u_f = \exp(b_0)$, $k_m = -(1/\delta b_1)^{1/\delta}$ 로 나타낼 수 있다.

$$\ln u = \ln u_f - \frac{1}{\delta \cdot k_m^\delta} \cdot k^\delta \quad (4.2.5)$$

$$u_1 = b_0 + b_1 k_1$$

여기서,

$b_0 = \ln u_f$: 모형의 회귀계수(km/h)

$b_1 = -\frac{1}{\delta k_m^\delta}$: 모형의 회귀계수($km^2/pc h$)

$u_1 = \ln u$

$k_1 = k^\delta$

3) Greenberg 모형

Greenberg 모형의 속도와 밀도관계를 나타내는 일반식은 다음의 식(4.2.6)와 같다.

$$u = u_m \cdot \ln\left(\frac{k_j}{k}\right) \quad (4.2.6)$$

여기서,

u : 공간평균속도(km/h)

k : 평균밀도(pc/km)

k_j : 혼잡밀도(pc/km)

u_m : 임계속도(km/h)

Greenberg 모형의 일반식은 변수의 치환을 통해서 다음의 식(4.2.7)과 같은 선형 회귀모형 식으로 표현할 수 있고, 매개변수인 임계속도(u_m)와 혼잡밀도(k_j)는 모형의 회귀계수를 이용하여 $u_m = -b_1$, $k_j = \exp(-b_0/b_1)$ 로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= u_m \cdot \ln k_j - u_m \cdot \ln k \\ &= b_0 + b_1 k_1 \end{aligned} \quad (4.2.7)$$

여기서,

$b_0 = u_m \cdot \ln k_j$: 모형의 회귀계수 (km/h)

$b_1 = -u_m$: 모형의 회귀계수 (km^2/pch)

$k_1 = \ln k$

4.2.2 모형 구축결과 및 선정

이 연구에서는 속도-밀도 모형 구축결과를 바탕으로 최적의 교통류모형을 선정하기 위해서 ①결정계수(determination coefficient, R^2)의 크기, ②표본의 표준편차(standard error of estimate, S_e)의 크기, ③회귀모형의 유의성 여부(F -검정), ④회귀계수의 유의성 여부(t -검정), ⑤회귀계수 부호의 합리성을 종합적으로 평가하였다.

다음의 Table 4.4는 속도-밀도 모형 구축결과로 이를 살펴보면, 결정계수와 표본의 표준편차의 경우 도심방향과 부도심방향의 모든 지점에서 Greenberg 모형을 제외한 모든 모형의 결정계수 값이 대체적으로 0.80이상, 표본의 표준편차는 대체적으로 7.00이하로 나타나 모형의 설명력과 현실묘사성이 뛰어난 것으로 나타났고, 회귀모형 및 회귀계수의 유의성 검정 결과 도심방향과 부도심방향의 모든 지점에서 유의수준이 거의 0.000으로 나타나 구축된 회귀모형이 적합한 것으로 나타났으며, 회귀계수의 경우 밀도가 증가함에 따라 속도가 감소하는 '-'부호를 나타냄으로써 회귀계수의 부호가 실제 현상에 부합되며 합리적인 것으로 판단되었다.

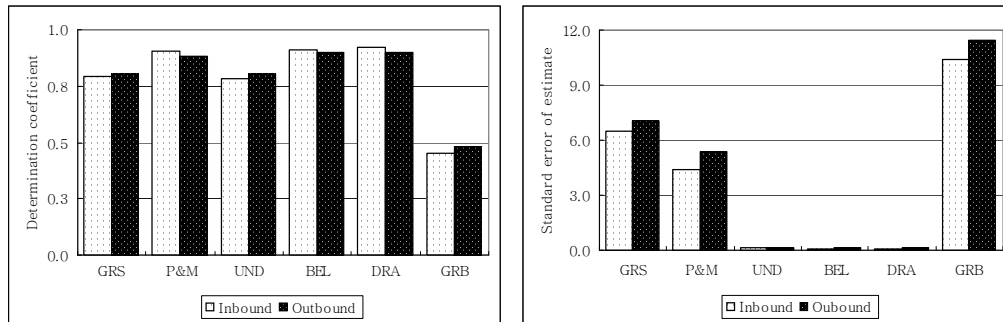
따라서 이 연구에서는 연구대상 도로상에서 관측된 교통류의 상태를 가장 잘 묘사할 수 있는 최적의 교통류모형으로 도심방향의 경우 결정계수 값이 0.919로 가장 높고, 표본의 표준편차가 0.087로 가장 낮은 Drake et al. ($\delta=2.4$) 모형을 선정하였고, 부도심방향의 경우 결정계수 값이 0.900으로 가장 높고, 표본의 표준편차가 0.122로 가장 낮은 Drake et al. ($\delta=2.1$) 모형을 선정하여 혼잡통행료 추정 및 평가 시 이용하였다(Fig. 4.2 참조).

Table 4.4 Construction results of speed–density models

Bound	Model		Regression coefficient		Determination coefficient (R^2)	Significance Prob. ($prob > F$)*	Standard error of estimate (Se)**
			b_0	b_1			
Inbound	Greenshields type model	Greenshields ($\beta=1.0$)	76.223 (0.000)	-0.8110 (0.000)	0.794	0.000	6.454
		Pipes&Munjal ($\beta=2.2$)	68.780 (0.000)	-0.0070 (0.000)	0.904	0.000	4.412
	Underwood type model	Underwood ($\delta=1.0$)	4.408 (0.000)	-0.0170 (0.000)	0.781	0.000	0.143
		Bell-shaped ($\delta=2.0$)	4.268 (0.000)	-0.0003 (0.000)	0.912	0.000	0.091
		Drake et al. ($\delta=2.4$)	4.239 (0.000)	-0.0001 (0.000)	0.919	0.000	0.087
	Greenberg model	Greenberg	86.918 (0.000)	-10.3690 (0.000)	0.450	0.000	10.369
Outbound	Greenshields type model	Greenshields ($\beta=1.0$)	72.325 (0.000)	-1.0300 (0.000)	0.802	0.000	7.043
		Pipes&Munjal ($\beta=2.0$)	64.393 (0.000)	-0.0220 (0.000)	0.884	0.000	5.383
	Underwood type model	Underwood ($\delta=1.0$)	4.389 (0.000)	-0.0250 (0.000)	0.807	0.000	0.170
		Bell-shaped ($\delta=2.0$)	4.196 (0.000)	-0.0010 (0.000)	0.899	0.000	0.123
		Drake et al. ($\delta=2.1$)	4.185 (0.000)	-0.0004 (0.000)	0.900	0.000	0.122
	Greenberg model	Greenberg	85.769 (0.000)	-12.6630 (0.000)	0.479	0.000	11.417

주 : 1) * : $P > |T| = P\text{-value}$, ** : standard error of estimate

2) () : t -통계량의 유의확률



Note : GRS(Greenshields), P&M(Pipes & Munjal), UND(Underwood), BEL(Bell-shaped), DRA(Drake et al.), GRB(Greenberg)

(a) Determination coefficients(R^2)

(b) Standard errors of estimate(S_e)

Fig. 4.2 Determination coefficients and standard errors of estimate

다음의 Table 4.5는 Greenshields형 모형, Underwood형 모형, Greenberg 모형에 대한 속도-밀도 모형 구축결과를 바탕으로 추정한 매개변수와 최대 교통류를 분석결과로 최적의 교통류모형으로 선정된 Drake et al. 모형의 매개변수와 최대 교통류를 살펴보면, 자유속도(u_f)의 경우 도심방향은 약 $69km/h$, 부도심방향은 약 $65km/h$ 정도를 보이는 것으로 나타났고, 임계속도(u_m)의 경우 도심방향은 약 $45km/h$, 부도심방향은 약 $40km/h$ 정도를 보이는 것으로 나타나 도심방향과 부도심방향에서 약 $5km/h$ 정도의 속도 차이를 보였으며, 임계밀도(k_m)의 경우 도심방향은 약 $32veh/km$, 부도심방향은 약 $29veh/km$ 정도를 보이는 것으로 나타났다.

또한 최대 교통류율(q_m)의 경우 도심방향은 약 $1,500pc/h/l$ 정도를 보이는 것으로 나타났고, 부도심방향은 약 $1,200pc/h/l$ 정도를 보이는 것으로 나타나 연구대상 조사지점에 따라 매개변수와 최대 교통류율이 다소 차이를 보이는 것으로 나타나 도심방향과 부도심방향의 공간적 범위에 따른 교통상황에 적합한 교통류 모형을 선정하여 혼잡통행료를 추정하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

Table 4.5 Results of parameters and maximum flow rate for each model

Bound	Model		Free flow speed (u_f)	Jam density (k_j)	Critical speed (u_m)	Critical density (k_m)	Maximum Flow rate (q_m)
Inbound	Greenshields type model	Greenshields ($\beta=1.0$)	76.223	93.986	38.112	46.993	1,791
		Pipes&Munjial ($\beta=2.2$)	68.780	65.270	47.286	38.468	1,819
	Underwood type model	Underwood ($\delta=1.0$)	82.105	-	30.205	58.824	1,777
		Bell-shaped ($\delta=2.0$)	71.379	-	43.294	40.825	1,767
		Drake et al. ($\delta=2.4$)	69.338	-	45.710	32.229	1,473
	Greenberg model	Greenberg	-	4,369.860	10.369	1,607.582	16,669
Outbound	Greenshields type model	Greenshields ($\beta=1.0$)	72.325	70.218	36.163	35.109	1,270
		Pipes&Munjial ($\beta=2.0$)	64.393	54.101	42.929	31.235	1,341
	Underwood type model	Underwood ($\delta=1.0$)	80.560	-	29.636	40.000	1,185
		Bell-shaped ($\delta=2.0$)	66.420	-	40.286	22.361	901
		Drake et al. ($\delta=2.1$)	65.694	-	40.806	29.149	1,189
	Greenberg model	Greenberg	-	874.102	12.663	321.564	4,072

다음의 Table 4.6은 Greenshields형 모형, Underwood형 모형, Greenberg 모형에 대한 속도-밀도 모형 구축결과를 바탕으로 추정된 매개변수를 이용하여 속도-밀도 모형과 교통량-속도 모형의 함수관계를 나타낸 것이고, Fig. 4.3과 Fig. 4.4는 속도-밀도 모형 구축결과 결정계수 값이 대략 0.80이상을 가지는 Greenshields형 모형과 Underwood형 모형에 대한 교통량-속도 관계를 그래프로 도식화 한 것으로 도심방향과 부도심방향의 경우 Drake et al. 모형이 연구대상 도로의 교통류 상태를 가장 잘 묘사하고 있는 것으로 나타났다.

Table 4.6 Speed–density and flow–speed function relationships by model construction result

Bound	Model		Speed-density function	Flow-speed function
Inbound	Greenshields type model	Greenshields ($\beta=1.0$)	$k = 93.986 \left(1 - \frac{u}{76.223}\right)$	$q = 93.986u \left(1 - \frac{u}{76.223}\right)$
		Pipes&Munjial ($\beta=2.2$)	$k = 65.270 \left(1 - \frac{u}{68.780}\right)^{\frac{1}{2.2}}$	$q = 65.270u \left(1 - \frac{u}{68.780}\right)^{\frac{1}{2.2}}$
	Underwood type model	Underwood ($\delta=1.0$)	$k = 58.824 \left(\ln \frac{82.105}{u}\right)$	$q = 58.824u \left(\ln \frac{82.105}{u}\right)$
		Bell-shaped ($\delta=2.0$)	$k = 40.825 \left(2.0 \cdot \ln \frac{71.379}{u}\right)^{\frac{1}{2.0}}$	$q = 40.825u \left(2.0 \cdot \ln \frac{71.379}{u}\right)^{\frac{1}{2.0}}$
		Drake et al. ($\delta=2.4$)	$k = 32.229 \left(2.4 \cdot \ln \frac{69.338}{u}\right)^{\frac{1}{2.4}}$	$q = 32.229u \left(2.4 \cdot \ln \frac{69.338}{u}\right)^{\frac{1}{2.4}}$
	Greenberg model	Greenberg	$k = 4,369.860 \cdot \exp\left(-\frac{u}{10.369}\right)$	$q = 4,369.860u \cdot \exp\left(-\frac{u}{10.369}\right)$
Outbound	Greenshields type model	Greenshields ($\beta=1.0$)	$k = 70.218 \left(1 - \frac{u}{72.325}\right)$	$q = 70.218u \left(1 - \frac{u}{72.325}\right)$
		Pipes&Munjial ($\beta=2.0$)	$k = 54.101 \left(1 - \frac{u}{64.393}\right)^{\frac{1}{2.0}}$	$q = 54.101u \left(1 - \frac{u}{64.393}\right)^{\frac{1}{2.0}}$
	Underwood type model	Underwood ($\delta=1.0$)	$k = 40.000 \left(\ln \frac{80.560}{u}\right)$	$q = 40.000u \left(\ln \frac{80.560}{u}\right)$
		Bell-shaped ($\delta=2.0$)	$k = 22.361 \left(2.0 \cdot \ln \frac{66.420}{u}\right)^{\frac{1}{2.0}}$	$q = 22.361u \left(2.0 \cdot \ln \frac{66.420}{u}\right)^{\frac{1}{2.0}}$
		Drake et al. ($\delta=2.1$)	$k = 29.149 \left(2.1 \cdot \ln \frac{65.694}{u}\right)^{\frac{1}{2.1}}$	$q = 29.149u \left(2.1 \cdot \ln \frac{65.694}{u}\right)^{\frac{1}{2.1}}$
	Greenberg model	Greenberg	$k = 874.102 \cdot \exp\left(-\frac{u}{12.663}\right)$	$q = 874.102u \cdot \exp\left(-\frac{u}{12.663}\right)$

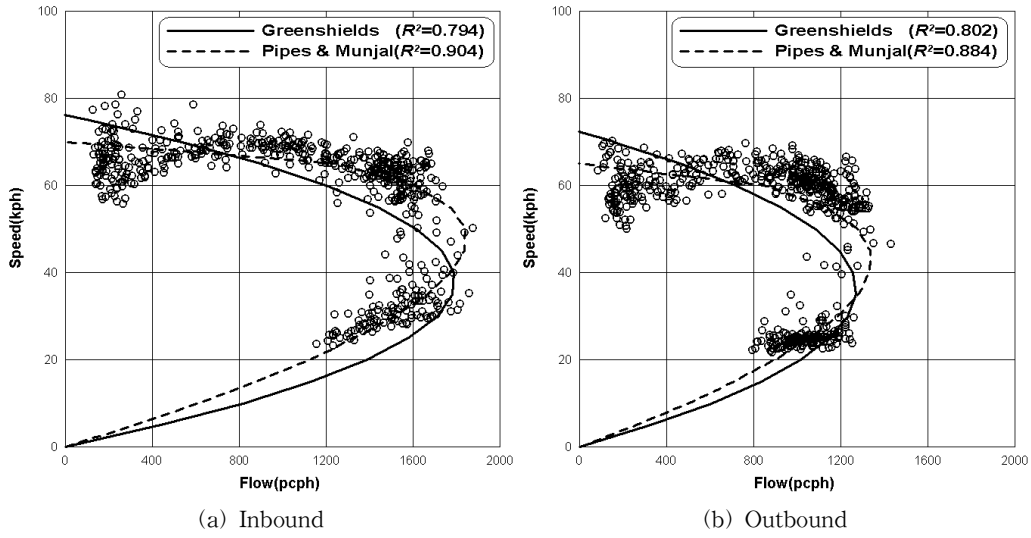


Fig. 4.3 Flow-speed function relationships of Greenshields type models

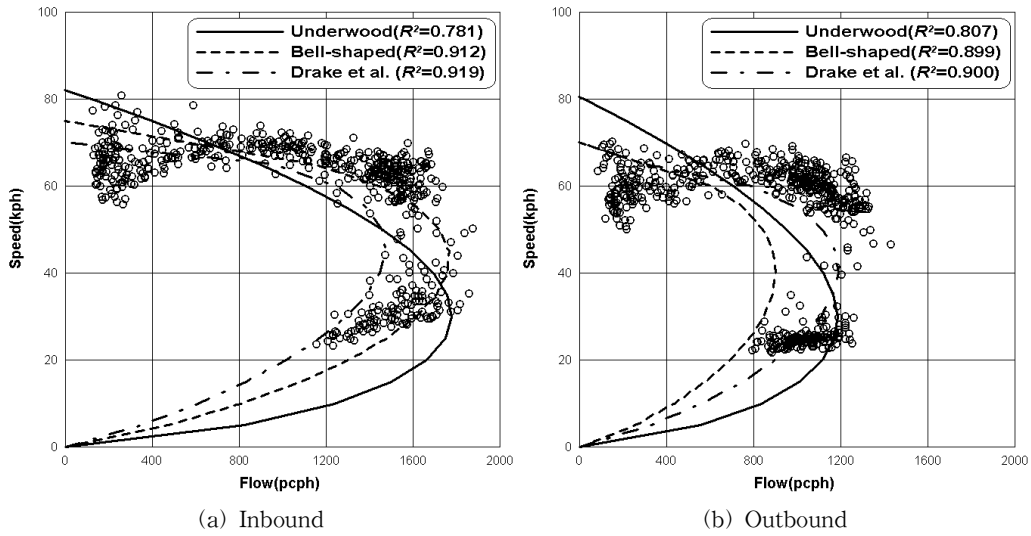
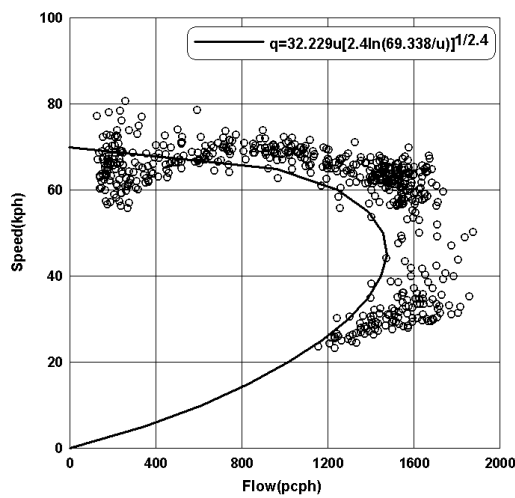


Fig. 4.4 Flow-speed function relationships of Underwood type models

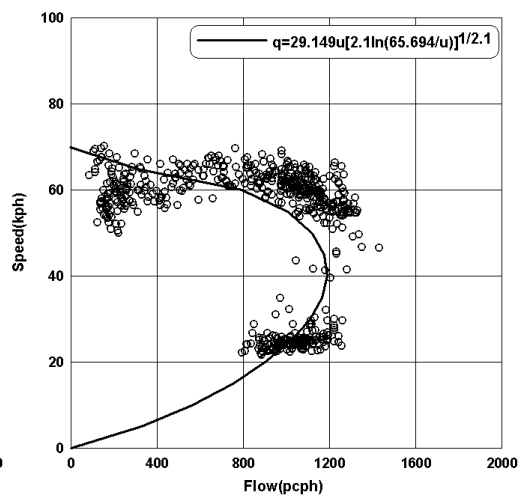
다음의 Table 4.7은 최적의 교통류모형으로 선정된 Drake et al. 모형(도심방향 : $\delta=2.4$, 부도심방향 : $\delta=2.1$)의 매개변수를 바탕으로 속도-밀도 모형의 함수관계를 적용하여 교통량-속도 모형의 함수관계를 나타낸 것이고, Fig. 4.5는 이를 교통량-속도 관계 그래프로 도식한 것이다.

Table 4.7 Optimal speed–density and flow–speed function relationships

Bound	Speed–density function	Flow–speed function
Inbound	$k = 32.229 \left(2.4 \cdot \ln \frac{69.338}{u} \right)^{\frac{1}{2.4}}$	$q = 32.229u \left(2.4 \cdot \ln \frac{69.338}{u} \right)^{\frac{1}{2.4}}$
Outbound	$k = 29.149 \left(2.1 \cdot \ln \frac{65.694}{u} \right)^{\frac{1}{2.1}}$	$q = 29.149u \left(2.1 \cdot \ln \frac{65.694}{u} \right)^{\frac{1}{2.1}}$



(a) Inbound



(b) Outbound

Fig. 4.5 Optimal flow–speed function relationships

4.3 혼잡통행료 추정 및 평가

4.1절에서 도출된 혼잡통행료 산정함수와 4.2절에서 선정된 최적의 교통류모형을 이용하여 혼잡통행료를 추정할 경우 필요한 입력변수로는 차량당 통행시간가치가 필요하다.

따라서 이 연구에서는 통행시간가치를 추정하는 대표적인 방법인 한계임금률법과 한계대체율법을 이용하여 업무통행의 시간가치를 추정하였고, 기존연구 결과를 바탕으로 업무통행의 시간가치에 대한 비업무통행의 시간가치 비율을 적용하여 비업무통행의 시간가치를 추정하였으며, 업무통행의 시간가치와 비업무통행의 시간가치에 승차인원과 통행목적비율을 적용하여 차량당 통행시간가치를 추정하여 혼잡통행료 추정 및 평가 시 이용하였다.

4.3.1 통행시간가치 추정

1) 통행시간가치 추정방법

통행(travel)이란 통행자가 어떤 목적을 수행하기 위하여 어느 한 지점을 출발하여 다른 지점까지 움직이는 행위를 말하는 것으로 통행목적(travel purpose)은 통행자가 생산 활동 업무를 위해서 행하는 업무통행(business travel)과 출근, 등교, 귀가, 쇼핑, 여가 등과 같은 비업무통행(non-business travel)으로 구분할 수 있으며, 이에 대한 통행시간가치를 추정하는 대표적인 방법에는 자원가치에 근거를 두고 있는 한계임금률법(marginal wage rate method, MWRM)과 행동가치에 근거를 두고 있는 한계대체율법(marginal rate of substitution method, MRSM)이 있다.

(1) 한계임금률법

한계임금률법은 통행자가 통행시간의 절감만큼을 자기 자신의 생산 활동 업무를 수행할 수 있다는 가정을 바탕으로 통행자의 단위업무시간당 한계임금을 통행시간가치로 추정하는 방법으로 회사관련 업무목적을 위한 통행의 시간가치

는 통행자의 근로시간당 임금으로 간주하여도 무방하나 업무목적통행이 아닌 경우, 즉 비업무목적에 의한 통행에 대한 시간가치는 이것보다는 낮은 값을 가질 것이므로 근로시간당 임금에 적절한 비율을 적용하여 추정하는 것이 일반적이다.

한계임금률법에 의한 통행시간가치는 다음의 식(4.3.1)과 식(4.3.2)에 의해 산출할 수 있다.

$$V_B = \frac{W}{T} \quad (4.3.1)$$

$$V_N = \frac{W}{T} \times \alpha = V_B \times \alpha \quad (4.3.2)$$

여기서,

V_B : 업무통행의 시간가치

V_N : 비업무통행의 시간가치

W : 월평균 한계임금

T : 월평균 근로시간

α : 비업무통행에 대한 업무통행의 시간가치 비율

(2) 한계대체율법

한계대체율법은 최근 널리 이용되고 있는 통행시간가치 추정방법으로 통행수단 또는 경로선택에 관련된 행태모형으로부터 통행시간과 통행비용을 변수로 하는 효용함수를 산출한 후 이들 변수간의 한계대체율을 구하여 통행시간가치로 추정하는 방법이다.

통행효용함수를 통행시간(t)과 통행비용(c)의 함수로 나타낼 수 있다면, 이 때 통행비용에 대한 통행시간의 한계대체율은 통행시간 1단위를 감소시킬 때 종전과 같은 효용을 유지하기 위하여 증가시켜야 할 통행비용의 크기를 나타낸다.

즉, 통행효용함수를 다음의 식(4.3.3)과 같이 정의하면

$$V(c, t) = \alpha + \beta_1 c + \beta_2 t \quad (4.3.3)$$

여기서,

α : 상수

c : 통행비용

t : 통행시간

β_1, β_2 : 효용함수의 계수

한계대체율은 이 효용함수의 기울기로 다음의 식(4.3.4)와 같이 각 변수에 대한 한계효용의 비로 나타낼 수 있다.

$$MRS = - \frac{dc}{dt} = \frac{\partial V / \partial t}{\partial V / \partial c} \quad (4.3.4)$$

여기서,

$\frac{\partial V}{\partial t}$: 통행시간에 대한 한계효용

$\frac{\partial V}{\partial c}$: 통행비용에 대한 한계효용

결국 통행시간가치는 각 변수에 대한 한계효용의 비, 즉 β_2/β_1 으로 구할 수 있다.

2) 업무통행의 시간가치 추정

(1) 한계임금률법에 의한 업무통행 시간가치 추정

한계임금률법은 통행자가 통행시간의 절감만큼을 자신의 생산 활동 업무수행에 사용할 수 있다는 가정을 바탕으로 통행자의 단위업무시간당 한계임금을 통행시간가치로 추정하는 방법으로 업무통행의 시간가치는 근로자가 업무시간동안 노동비용과 같은 크기의 생산을 할 수 있으므로 고용주가 부담하는 비용과 같다고 볼 수 있다.

따라서 업무시간동안 통행시간이 단축되어 여분의 시간에 업무수행이 가능하게 되면 그 만큼 소득을 얻을 수 있거나 생산량이 높아지므로 급여소득자의 평균임금을 평균근로시간으로 나누어 추정할 수 있다. 업무통행의 시간가치는 통행자의 근로시간당 평균임금 이외에도 고용주가 근로자들의 복리후생을 위해 부가적으로 지출하는 오버헤드(overheads or fringe benefits)비용을 추가하여 산출하는데 이 비용은 급여와 유사한 성격을 갖는 것으로 결국 개인에게 귀속될 수 있는 비용이기 때문이다.

이 연구에서는 한계임금률법에 의한 업무통행의 시간가치를 산출하기 위해서 차종별 운전자 1인당 월평균 급여액, 평균근로시간, 오버헤드비용을 분석하였다. 차종별 운전자 1인당 월평균 급여액과 평균근로시간은 『운수업통계조사(2006)』 자료와 『노동통계조사(2006)』 자료를 바탕으로 전국 시도별 자료 중 부산광역시 자료만을 이용하였고, 오버헤드비용은 한국은행에서 제공하는 『기업경영분석(2006)』 자료를 바탕으로 전체급여에 대한 오버헤드비용의 비율을 추정하여 업무통행의 시간가치에 반영하였다.

기업경영분석은 우리나라 제조업과 비제조업 법인기업의 경영성과를 재무구조, 수익성, 성장성 및 생산성 등을 중심으로 분석한 자료로 각 기업을 업종별로 분류하여 손익계산서를 제시하고 있으며, 급여, 퇴직급여, 복리후생비, 보험료 등이 제시되어 있다. 그러나 근로자의 임금 외에 무엇을 오버헤드비용으로 포함할 것인지는 정확한 분류기준이 없는 실정이므로 이 연구에서는 근로자에게 귀속된다고 볼 수 있는 퇴직급여, 복리후생비, 보험료를 오버헤드비용을 간주하여 업무통행의 시간가치 추정시 이용하였다.

기업경영분석 자료를 바탕으로 추정된 전체급여에 대한 오버헤드비용의 비율은 승용차운전자 28.22%, 버스운전자 26.82%, 화물차운전자 24.63%로 분석되어 이 비율만큼을 각 차종별 운전자의 근로시간당 평균임금에 추가하여 업무통행의 시간가치를 추정한 결과, 승용차운전자 13,862원/인·시간, 버스운전자 16,105원/인·시간, 화물차운전자 15,323원/인·시간으로 추정되었다(Table 4.8 및 Table 4.9 참조).

Table 4.8 Estimation of overheads percentage for wage

(단위 : million won, %)

Driver by type of vehicle		Passenger car driver	Bus driver	Trunk driver
Total wage(A)		59,456,273	690,209	340,915
Overheads cost(B)	Retirement allowance	6,055,935	56,786	26,759
	Welfare pension	9,103,258	99,972	40,666
	Insurance cost	1,619,202	28,382	16,553
	sum	16,778,395	185,140	83,978
Overheads percentage(B/A×100)		28.22	26.82	24.63
Note		육상여객운송업과 도로화물운송업을 제외한 전산업	육상여객운송업 (I602)	도로화물운송업 (I603)

자료 : 한국은행 경제통계시스템(<http://ecos.bok.or.kr>), 『기업경영분석(2006년 기준)』

주 : 비고란의 ()은 표준산업분류번호임

Table 4.9 Estimation of business travel time value using marginal wage rate method

Driver by type of vehicle	Passenger car driver	Bus driver	Truck driver
Average monthly wage per person (won/moth)	2,008,718	2,358,212	2,283,272
Average monthly labor time (hour/month)	185.8	185.7	
Average wage per labor time (won/person · hour)	10,811	12,699	12,295
Overheads percentage for wage(%)	28.22	26.82	24.63
Travel time value (won/person · hour)	13,862	16,105	15,323

자료 : 1) 국가통계포털(<http://www.kosis.kr>), 『운수업통계조사(2006년 기준)』

2) 노동통계정보시스템(<http://laborstat.molab.go.kr>), 『노동통계조사(2006년 기준)』

3) 한국은행 경제통계시스템(<http://ecos.bok.or.kr>), 『기업경영분석(2006년 기준)』

주 : 1) 1인당 월평균 급여액과 평균근로시간에 대한 통계자료는 전국 시도별 자료 중 부산광역시 자료만 이용하였음.

2) 승용차운전자 급여액은 농업을 제외한 전산업의 급여액이고, 버스운전자 급여액은 시내버스, 시외버스, 마을버스, 전세버스 운송업 급여액을 평균한 것이고, 화물차운전자 급여액은 일반화물자동차 급여액임.

3) 근로시간은 정상근로시간과 초과근로시간을 합산한 시간임.

4) 임금에 대한 오버헤드비용인 퇴직급여, 복리후생비, 보험료는 한국은행 『기업경영분석』 상에서 제시된 손익계산서를 바탕으로 산출하였음.

(2) 한계대체율법에 의한 업무통행 시간가치 추정

한계대체율법은 통행수단 또는 경로선택에 관련된 행태모형으로부터 통행시간과 통행비용을 변수로 하는 효용함수를 산출한 후 이들 변수간의 한계대체율을 구하여 통행시간가치로 추정하는 방법으로 이 연구에서는 『2004년 국가교통DB 구축사업(부산·울산광역시권)』 상에서 구축된 수단선택모형을 이용하여 통행시간가치를 추정하였으며, 수단선택모형의 기본 식은 다음의 식(4.3.5)과 같다.

$$U_{ijm} = a_1 Time_{ijm} + a_2 COST_{ijm} + D_{1m} + D_{2m} + D_{3m} \quad (4.3.5)$$

여기서,

$Time_{ijm}$: 수단 m 의 존 i 와 j 간의 총 통행시간

$COST_{ijm}$: 수단 m 의 존 i 와 j 간의 총 통행비용

D_m : 수단 m 의 더미

a_1, a_2, a_n : 계수

다음의 Table 4.10은 부산광역시 수단선택모형 구축결과로 이를 살펴보면, 모형구축에 사용된 통행시간과 통행비용 변수, 대안특성 변수인 존 내 대학 유무, 존 내 지하철역 유무 변수들이 모두 논리적으로 합리적인 부호를 갖는 것으로 나타났고, 개별 변수들의 파라미터 계수 값이 유의수준 5%에서 t -통계량 분석 결과 모두 ± 1.96 이상을 보임으로써 모형식이 매우 신뢰할 수 있는 것으로 나타났다으며, 모형의 전체적인 적합도(goodness of fit)를 나타내는 우도비(ρ^2)가 0.2449로 나타나 적합도가 매우 신뢰성이 있는 것으로 나타났다.

따라서 부산광역시 수단선택모형 구축결과를 바탕으로 통행시간과 통행비용에 대한 파라미터계수 값을 이용하여 업무통행의 시간가치를 추정한 결과 7,754원/인·시간으로 추정되었다.

Table 4.10 Estimation of business travel time value using marginal rate of substitution method

Parameter coefficient & t -statistic	Parameter coefficient	t -statistic
D_a	0.558200	12.362
D_b	1.268100	27.816
D_s	-0.413700	-5.961
Travel time(min)	-0.030500	-25.498
Travel cost(won)	-0.000236	-22.821
University existence or nonexistence in zone	0.348730	11.512
Subway station existence or nonexistence in zone	2.034300	31.040
$L(\hat{\beta})$	-29,649.43	
$L(0)$	-39,266.79	
ρ^2	$1 - (-29,649.43 \div -39,266.79) \approx 0.2449$	
Travel time value(won/person · hour)	$-0.030500 \div -0.000236 \times 60 \approx 7,754$	

주 : 1) $L(\hat{\beta})$ 는 추정 파라미터 $\hat{\beta}$ 를 대입할 때의 대수우도이고, $L(0)$ 는 추정 파라미터를 0으로 할 때의 대수우도임.

2) 우도비(ρ^2)비는 선택확률의 적합성을 보여주는 것으로 0과 1사이에 존재하고, 1에 가까울수록 모형의 적합도가 높은 것으로 설명됨. 지금까지의 연구결과 0.2~4.0정도일 때는 모형의 적합도가 신뢰성이 있다고 해석되고 있으며, 우도비 산출은 $1 - L(\hat{\beta})/L(0)$ 로 산출됨.

3) 비업무통행의 시간가치 추정

비업무통행의 시간가치는 업무통행의 시간가치에 적절한 비율을 적용하여 추정하는 것이 일반적으로 이 연구에서는 기존연구 결과를 바탕으로 업무통행의 시간가치에 대한 비업무통행의 시간가치 비율을 적용하여 통행시간가치를 추정하였다.

다음의 Table 4.11과 Table 4.12는 국내외 승용차운전자의 통행목적에 따른 통행시간가치에 대한 연구결과로 업무통행의 시간가치에 대한 비업무통행의 시간가치의 비율을 살펴보면, 국외의 경우 영국, 독일, 프랑스, 덴마크는 18~43%, 노르웨이는 27~80%의 폭을 보이고 있는 것으로 나타났고, 국내의 경우 32.7~68.9%의 폭을 보이는 것으로 나타났으며, 전반적으로 통행거리가 긴 지역 간 통행이 통행거리가 짧은 도시간 통행에 비해서 더 높은 값을 보이는 것으로

나타나 업무통행의 시간가치에 대한 비업무통행의 시간가치 비율이 매우 다양하게 분포되어 있는 것으로 나타났다.

Table 4.11 Travel time value percentage of passenger car drivers underlying travel purposes(Abroad)

Travel purposes	Travel time value percentage						
	U.K.	Germany	Norway		France	Denmark	U.S.A., Japan
Business travel	100%	100%	100%		100%	115%	100%
Non-busin ess travel	43%	19%	27%~35%	45%~80%	25%	18%	-
Note	업무통행은 임금률법을 적용	-	도시 간통행	지역 간통행	통근통행50%	통근통행30%	-

자료 : 『도로사업 투자분석 기법정립』, 국토연구원, 1999

주 : 1) 통근통행 50%는 통근통행의 시간가치가 임금률법에 의한 업무통행시간가치의 50%에 해당한다는 뜻임

2) 업무통행과 비업무통행을 구별하지 않고 동일한 통행시간가치 적용

Table 4.12 Travel time value percentage of passenger car drivers underlying travel purposes(in Korea)

Travel purposes	Travel time value percentage					
	통행목적별 수단별 통행시간가치 산출 및 유의성 검정 (김현외 2인, 1999)	우리나라 지역간 통행의 시간가치 산출 연구 (조남건, 2001)	유료도로의 통행시간가치 산정에 관한 연구 (김태희 외 5인, 2003)			도로·철도부문 사업의 예비타당성 조사 표준지침 수정·보완 연구 (제4판) (KDI, 2004)
			단거리 (30분이하)	중거리 (30~90분)	장거리 (90분이상)	
Business travel	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Non-business travel	55.8%	32.7%	49.5%	68.9%	67.0%	32.7%
Note	도시간통행(비업무통행은 통근통행과 통학통행으로 간주함)		수도권(도시간통행), 비수도권(지역간통행)			지역간통행

따라서 이 연구에서는 국내에서 가장 최근에 연구된 『도로·철도부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완연구(제4판)(2004)』 상에서 제시하고 있는 업무통행의 시간가치에 대한 비업무통행의 시간가치 비율인 32.7%를 적용하

여 비업무통행의 시간가치를 추정한 결과, Table 4.13에서 보는바와 같이 한계 임금률법에 의한 비업무통행의 시간가치는 4,533원/인·시간, 한계대체율법에 의한 비업무통행시간가치는 2,536원/인·시간으로 추정되었다.

Table 4.13 Estimation of non-business travel time value

(단위 : won/person · hour, %)

Estimation method	Business travel time value	Non-business travel time value percentage for business travel time value	Non-business travel time value
MWRM	13,862	32.7	4,533
MRSB	7,754		2,536

4) 차량당 통행시간가치 추정

상기에서 추정한 업무통행의 시간가치와 비업무통행의 시간가치는 승객 1인당 통행시간가치로 차량에 대해서 부과되는 혼잡통행료를 추정하기 위해서는 차량당 통행시간가치로 환산해야 한다.

따라서 이 연구에서는 차량당 승차인원과 업무통행 및 비업무통행에 대한 목적통행비율을 적용하여 차량당 통행시간가치를 추정하였는데, 차량당 승차인원은 『2006년도 부산광역시 교통조사(Ⅱ), 승객통행량조사결과』 자료를 이용하였고, 업무통행 및 비업무통행에 대한 목적통행비율은 『부산광역시 도시교통정비증기계획(2005)』 상에 제시된 목적통행량을 이용하였다(Table 4.14 참조).

차량당 통행시간가치 추정결과를 살펴보면, Table 4.15에서 보는바와 같이 한계임금률법에 의한 통행시간가치는 6,826원/대로 추정되었고, 한계대체율법에 의한 통행시간가치는 3,818원/대로 추정되어 한계임금률법에 의한 통행시간가치가 한계대체율법에 의한 통행시간가치보다 더 높은 것으로 나타났다. 이는 한계임금률법에 의한 통행시간가치는 2006년 기준으로 추정된 반면에 한계대체율법에 의한 통행시간가치는 2004년 기준으로 추정되어 한계대체율법에 의한 통행시간가치가 시간에 따른 소득수준 변화를 고려하지 못하고 있기 때문에 한계임금률법에 의한 통행시간가치보다 낮게 나타난 것으로 판단되었다.

따라서 이 연구에서는 연구대상 도시고속도로에 대한 혼잡통행료 추정시 한계임금률법에 의한 통행시간가치와 한계대체율법에 의한 통행시간가치를 모두 사용하여 차량당 통행시간가치에 따른 혼잡통행료의 변화를 비교·분석하고, 속도에 따른 가변적인 혼잡통행료를 추정 및 평가하였다.

Table 4.14 Estimation of occupancy and travel purposes percentage

Occupancy & travel purposes percentage		Passenger car
Occupancy(person/veh)		1.3
Travel purpose percentage(%)	Business travel	9.91
	Non-business travel	90.09

자료 : 1) 2006년도 부산광역시 교통조사(Ⅱ) 승객통행량조사결과, 2007. 2, 부산광역시(2006년 기준)

2) 부산광역시 도시교통정비증기계획(요약보고서), 2005. 2, 부산광역시(2006년 기준)

주 : 1) 승차인원은 『부산광역시 교통조사(Ⅱ) 승객통행량조사결과』 상에 제시된 승차인원을 이용하여 산출하였음.

2) 통행목적분포비율은 『부산광역시 도시교통정비증기계획』 상에서 제시된 2006년 기준 목적통행량을 업무통행과 비업무통행으로 구분하여 산출하였음.

Table 4.15 Estimation of passenger car average travel time value

Estimation method	MWRM(c_1)		MRSM(c_2)	
	Business travel	Non-business travel	Business travel	Non-business travel
Occupancy (person/veh)	0.1	1.2	0.1	1.2
Travel time value (won/person)	13,862	4,533	7,754	2,536
Travel time value (won/veh)	1,386	5,440	775	3,043
Average travel time value (won/veh)	6,826		3,818	

주 : 1) 승차인원의 통행목적분포비율은 『부산광역시 도시교통정비증기계획』 상에서 제시된 2006년 기준 목적통행량을 적용하였음(업무통행 : 비업무통행 = 9.91 : 90.09).

2) 한계임금률법의 통행시간가치는 업무통행의 경우 한계임금률법을 적용하였고, 비업무통행은 『도로·철도부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완연구(제4판)』 상에서 제시된 32.7%를 적용하였음.

3) 한계임금률법의 통행시간가치는 『2004년 국가교통DB구축사업(부산·울산광역시권)』 상에서 제시된 통행시간가치를 적용하였고, 비업무통행은 『도로·철도부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완연구(제4판)』 상에서 제시된 32.7%를 적용하였음.

4.3.2 혼잡통행료 추정 및 평가

이 연구는 지능형 교통시스템(ITS)인 통행료자동징수시스템(ETCS) 도입을 전제로 한 교통류의 상황변화에 따른 가변적인 혼잡통행료 추정 및 평가에 관한 연구로 연구대상 도로구간인 제1도시고속도로(번영로) 내 도심방향과 부도심방향의 본선구간 상에서 실시간으로 수집된 교통특성자료를 바탕으로 한 교통류 모형과 차량당 통행시간가치를 이용하여 혼잡통행료를 추정 및 평가하였으며, 혼잡통행료 부과대상 차량은 대용량의 수송서비스를 제공하는 버스와 생계 및 영업을 위주로 운영되는 화물차 등을 제외한 자가용 승용차만을 대상으로 한정하였다. 이는 혼잡통행료 부과의 목적이 도로의 혼잡정도에 따른 적절한 통행료 부과를 통해서 자가용 승용차 이용을 줄임과 동시에 대중교통이용의 활성화를 도모하여 교통시설을 효율적으로 이용하고자 하는데 있기 때문이다.

이 연구에서는 혼잡통행료를 추정 및 평가하기 위해서 교통류모형은 4.2절 혼잡통행료 모형 구축 및 선정에서 최적의 모형으로 선정된 Drake et al. 모형(도심방향 : $\delta=2.4$, 부도심방향 : $\delta=2.1$)을 이용하였고, 차량당 통행시간가치는 4.3.1절 통행시간가치 추정에서 추정된 한계임금률법에 의한 차량당 통행시간가치(c_1) 6,826원/대와 한계대체율법에 의한 차량당 통행시간가치(c_2) 3,818원/대를 이용하였다.

교통류모형을 이용한 혼잡통행료 추정방법은 수요곡선이 한계비용곡선과 교차하고 평균비용곡선이 증가하는 최대 교통류율 상태 이전의 속도영역에서는 혼잡통행료가 추정되지만, 최대 교통류율 상태 이후의 속도영역에서는 혼잡통행료가 추정되지 않는 방법으로 이 연구대상 도로구간인 제1도시고속도로 내 도심방향과 부도심방향에서 혼잡통행료가 추정되는 속도영역을 살펴보면, 도심방향의 경우 $45.710\text{km/h} < u < 69.337\text{km/h}$ 영역으로 나타났고, 부도심방향의 경우 $40.806\text{km/h} < u < 65.695\text{km/h}$ 영역으로 나타났으며, 혼잡통행료가 추정되지 않은 속도영역은 도심방향의 경우 45km/h 이하 영역, 부도심방향의 경우 40km/h 이하 영역으로 나타났다.

따라서 이 연구에서는 혼잡통행료 추정이 가능한 속도영역 중에서 60km/h 이하의 영역에 대해서 교통상황 변화에 따른 혼잡통행료를 추정하였다.

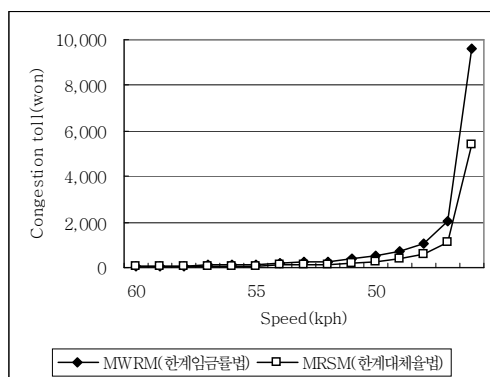
이 연구대상 도로구간인 제1도시고속도로 내 도심방향과 부도심방향의 교통상황 변화에 따른 혼잡통행료 추정결과를 살펴보면, 교통류모형(도심방향 ; Drake et al. 모형($\delta=2.4$), 부도심방향 ; Drake et al. 모형($\delta=2.1$))에 따라 도심방향과 부도심방향의 혼잡통행료 추정 결과가 다소 차이가 있는 것으로 나타나 도심방향과 부도심방향의 공간적 범위에 따라 혼잡정도에 차이가 있음을 판단할 수 있었고, 속도가 높을 때는 혼잡통행료가 낮게 책정되는 반면에 속도가 점차 낮아질수록 혼잡통행료가 높게 책정되는 것으로 나타나 확일적으로 혼잡통행료를 부과하는 것 보다 혼잡정도에 따라 가변적으로 혼잡통행료를 부과하는 것이 보다 효율적일 것으로 판단되었다. 그러나 교통류율이 최대 교통류율 상태인 도로용량 상태일 때 도심방향과 부도심방향에서 한계임금률법과 한계대체율법에 의한 차량당 통행시간가치를 적용하여 혼잡통행료를 추정한 결과를 살펴보면, 도심방향의 경우 한계임금률법에 의한 차량당 통행시간가치를 적용하였을 때는 혼잡통행료가 9,628원/대로 추정되었고, 한계대체율법에 의한 차량당 통행시간가치를 적용하였을 때는 혼잡통행료가 5,385원/대로 추정되었으며, 부도심방향의 경우 한계임금률법에 의한 차량당 통행시간가치를 적용하였을 때는 혼잡통행료가 16,549원/대로 추정되었고, 한계대체율법에 의한 차량당 통행시간가치를 적용하였을 때는 혼잡통행료가 9,256원/대로 추정되어 혼잡통행료가 급격하게 높게 책정되는 것으로 나타났는데, 이를 도로이용자에게 부과하게 되면 도로이용자에게 높은 가격부담을 지우게 되어 실질적인 혼잡통행료 부과집행이 어려울 수 있을 것으로 판단되므로 실제 혼잡통행료를 부과할 때에는 해당 도로에 대한 혼잡수준과 도로이용자의 반발 등을 종합적으로 판단하여 적정수준의 혼잡통행료를 결정해야 할 것으로 판단되었다(Table 4.16 및 Fig. 4.6 참조).

Table 4.16 Estimation result of congestion toll at the inbound and outbound

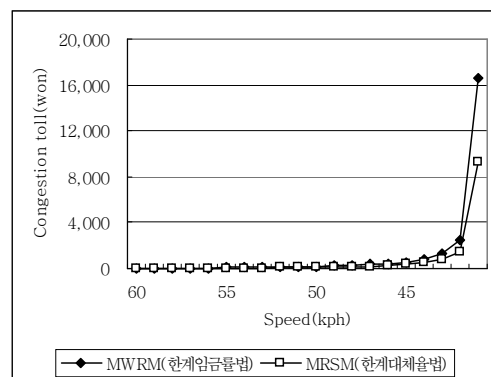
Inbound : Drake et al.($\delta=2.4$)					Outbound : Drake et al.($\delta=2.1$)				
Speed (km/h)	Flow (pc/h/l)	Density (pc/km)	MWRM ($c_1=6,826$)	MRSRM ($c_2=3,818$)	Speed (km/h)	Flow (pc/h/l)	Density (pc/km)	MWRM ($c_1=6,826$)	MRSRM ($c_2=3,818$)
60	1,244	35	60	34	60	794	20	27	15
59	1,281	36	73	41	59	846	21	34	19
58	1,313	38	88	49	58	893	23	42	23
57	1,342	39	106	59	57	934	24	51	28
56	1,366	41	128	72	56	970	26	61	34
55	1,388	42	155	87	55	1,003	27	74	41
54	1,407	43	190	106	54	1,031	28	88	49
53	1,423	45	234	131	53	1,057	29	106	59
52	1,436	46	293	164	52	1,080	31	127	71
51	1,448	47	375	210	51	1,100	32	152	85
50	1,457	49	498	278	50	1,118	33	183	103
49	1,464	50	696	389	49	1,134	34	223	125
48	1,469	51	1,070	598	48	1,147	35	275	154
47	1,472	52	2,029	1,135	47	1,159	36	344	192
46	1,473	53	9,628	5,385	46	1,168	37	441	247
45	-	-	-	-	45	1,176	39	587	328
44	-	-	-	-	44	1,182	40	825	462
43	-	-	-	-	43	1,186	41	1,285	719
42	-	-	-	-	42	1,188	42	2,521	1,410
41	-	-	-	-	41	1,189	43	16,549	9,256

주 : 1) 혼잡통행료 추정 값은 1km단위로 계산된 값임.

2) 최대 교통량을 상태에서 속도-교통량 곡선은 후굴 곡선(backward bending)의 형태를 띠며, 평균비용(average cost, AC)곡선 또한 후굴 곡선의 형태를 가지므로 최대 교통량을 지점 상에서는 혼잡비용공식을 적용할 수 없음.



(a) Inbound



(b) Outbound

Fig. 4.6 Congestion tolls compared by MWRM and MRSRM

상기의 Table 4.16에서 살펴보았듯이, 교통류율이 최대 교통류율 상태에 도달할 때에는 혼잡통행료가 상당히 높게 책정되어 혼잡통행료 부과정책의 실현가능성이 낮을 수 있지만, 최대 교통류율 상태(즉, 과포화 상태)에서 적은 액수의 혼잡통행료를 부과하는 방식은 실현가능성이 높을 수 있다. 이 경우 오히려 개별 통행당 통행비용이 증가를 하므로 사회적 비용이 감소하게 된다. 따라서 이 연구에서는 도로이용자의 반발을 최소화하기 위한 일환으로 속도를 계급구간별로 나누어 혼잡통행료를 재 추정 하였다.

이 연구대상 도로구간인 제1도시고속도로 내 도심방향과 부도심방향의 혼잡통행료 추정결과를 Table 4.16와 같이 속도를 계급구간별로 나누지 않았을 때와 Table 4.17과 같이 속도를 계급구간별로 나누었을 때를 상호 비교해 보면, 속도를 계급구간별로 나눌 경우 속도를 계급구간별로 나누지 않았을 때에 비해 혼잡통행료가 높지 않게 책정되는 것으로 나타나 이 연구에서 적용한 혼잡통행료를 추정방법을 이용하여 혼잡통행료 부과정책을 시행할 때에는 속도를 계급구간별로 나누어 혼잡통행료를 책정하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

Table 4.17 Estimation result of congestion toll by speed interval at the inbound and outbound

Inbound : Drake et al.($\delta=2.4$)					Outbound : Drake et al.($\delta=2.1$)				
Speed (km/h)	Flow (pc/h/l)	Density (pc/km)	MWRM ($c_1=6,826$)	MRSM ($c_2=3,818$)	Speed (km/h)	Flow (pc/h/l)	Density (pc/km)	MWRM ($c_1=6,826$)	MRSM ($c_2=3,818$)
60~55	1,250~ 1,400	35~40	60~130 (≈ 90)	30~70 (≈ 50)	60~55	800~ 1,000	20~25	30~60 (≈ 40)	20~30 (≈ 20)
55~50	1,400~ 1,500	40~50	160~380 (≈ 230)	90~210 (≈ 130)	55~50	1,000~ 1,100	25~30	70~150 (≈ 110)	40~90 (≈ 60)
50이하	1,500 이상	50 이상	500~9,630 ($\approx 1,070$)	280~5,390 (≈ 600)	50~45	1,100~ 1,200	30~40	180~440 (≈ 280)	100~250 (≈ 150)
-	-	-	-	-	45이하	1,200 이상	40 이상	590~16,550 ($\approx 1,290$)	330~9,260 (≈ 720)

- 주 : 1) 교통량은 50단위로 환산한 값이고, 밀도는 5단위로 환산한 값임
 2) 혼잡통행료 추정 값은 10원단위로 환산한 값임.
 3) ()값은 속도구간별 중앙값(median)에 해당하는 혼잡통행료임.

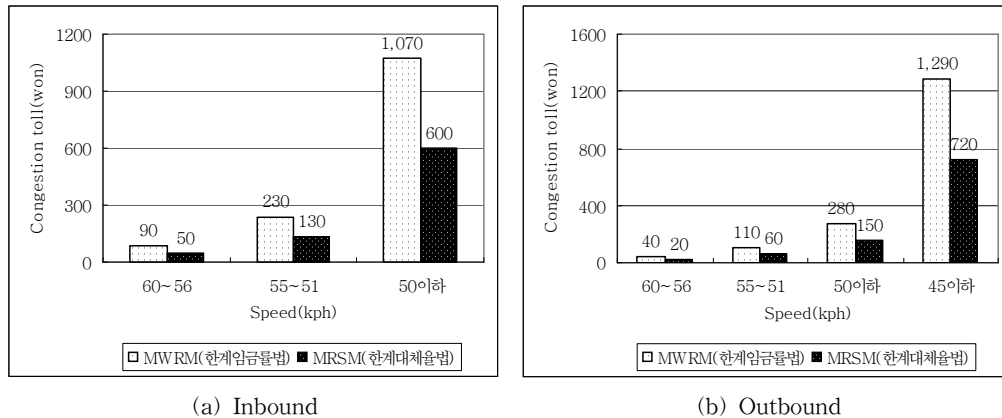


Fig. 4.7 Congestion tolls compared by speed interval

다음의 Table 4.18과 Table 4.19는 이 연구대상 도로구간인 제1도시고속도로 내 도심방향과 부도심방향상에서 수집된 관측 자료를 바탕으로 혼잡통행료 지불방식에 따른 혼잡통행료 추정결과로 획일적인 혼잡통행료 부과시에는 속도가 $60km/h$ 이하 일 때 도심방향의 경우 한계임금률법은 차량당 1,070원, 한계대체율법은 차량당 600원을 적용하여 혼잡통행료를 추정하였고, 부도심방향의 경우 한계임금률법은 차량당 1,290원, 한계대체율법은 차량당 720원을 적용하여 혼잡통행료를 추정하였으며, 가변적인 혼잡통행료 부과시에는 Table 4.17에서 속도를 계급구간별로 나누어 추정된 차량당 혼잡통행료를 적용하여 혼잡통행료를 추정하였다.

이 연구대상 도로구간인 제1도시고속도로내 도심방향과 부도심방향상에서의 혼잡통행료 지불방식에 따른 하루 동안의 혼잡통행료 추정결과를 상호비교해보면, 도심방향과 부도심방향의 모든 지점에서 획일적으로 혼잡통행료를 부과하였을 때보다 가변적으로 혼잡통행료를 부과하였을 때 혼잡통행료가 더 적게 부과 되는 것으로 나타나 도로상의 교통혼잡 정도에 관계없이 획일적으로 혼잡통행료를 부과하는 것보다 교통혼잡 정도에 따라 가변적으로 혼잡통행료를 부과하는 것이 도로 이용자 측면에서 볼 때 더욱 효율적일 것으로 판단되었다.

Table 4.18 Inbound results by the CT payment method(Wed.)

Time Period	Inbound : Drake et al.($\delta=2.4$)					
	Flow rate (<i>pc/h/l</i>)	Speed (<i>km/h</i>)	MWRM		MRSM	
			Uniform congestion toll	Variable congestion toll	Uniform congestion toll	Variable congestion toll
00:00-01:00	486	66.43	-	-	-	-
01:00-02:00	304	60.50	-	-	-	-
02:00-03:00	180	68.01	-	-	-	-
03:00-04:00	186	57.33	199,020	16,740	111,600	9,300
04:00-05:00	274	61.75	-	-	-	-
05:00-06:00	666	69.96	-	-	-	-
06:00-07:00	1,596	63.50	-	-	-	-
07:00-08:00	1,710	32.38	1,829,700	1,829,700	1,026,000	1,026,000
08:00-09:00	1,642	31.18	1,756,940	1,756,940	985,200	985,200
09:00-10:00	1,686	37.26	1,804,020	1,804,020	1,011,600	1,011,600
10:00-11:00	1,646	33.57	1,761,220	1,761,220	987,600	987,600
11:00-12:00	1,548	57.51	1,656,360	139,320	928,800	77,400
12:00-13:00	1,402	59.96	1,500,140	126,180	841,200	70,100
13:00-14:00	1,608	57.37	1,720,560	144,720	964,800	80,400
14:00-15:00	1,622	50.19	1,735,540	373,060	973,200	210,860
15:00-16:00	1,548	58.54	1,656,360	139,320	928,800	77,400
16:00-17:00	1,526	62.69	-	-	-	-
17:00-18:00	1,606	54.85	1,718,420	369,380	963,600	208,780
18:00-19:00	1,736	59.76	1,857,520	156,240	1,041,600	86,800
19:00-20:00	1,516	29.47	1,622,120	1,622,120	909,600	909,600
20:00-21:00	1,202	67.08	-	-	-	-
21:00-22:00	1,088	69.86	-	-	-	-
22:00-23:00	908	69.80	-	-	-	-
23:00-24:00	730	69.45	-	-	-	-
Total	-	-	20,817,920	10,238,960	11,673,600	5,741,040

Table 4.19 Outbound results by the CT payment method(Wed.)

Time Period	Outbound : Drake et al.($\delta=2.1$)					
	Flow rate (<i>pc/h/l</i>)	Speed (<i>km/h</i>)	MWRM		MRSM	
			Uniform congestion toll	Variable congestion toll	Uniform congestion toll	Variable congestion toll
00:00–01:00	572	66.12	–	–	–	–
01:00–02:00	434	59.62	559,860	17,360	312,480	8,680
02:00–03:00	234	52.17	301,860	25,740	168,480	14,040
03:00–04:00	180	56.88	232,200	7,200	129,600	3,600
04:00–05:00	246	63.63	–	–	–	–
05:00–06:00	650	68.07	–	–	–	–
06:00–07:00	940	65.41	–	–	–	–
07:00–08:00	1,234	63.59	–	–	–	–
08:00–09:00	1,220	65.60	–	–	–	–
09:00–10:00	1,310	56.92	1,689,900	52,400	943,200	26,200
10:00–11:00	1,312	55.56	1,692,480	52,480	944,640	26,240
11:00–12:00	1,288	54.78	1,661,520	141,680	927,360	77,280
12:00–13:00	1,174	58.12	1,514,460	46,960	845,280	23,480
13:00–14:00	1,214	56.44	1,566,060	48,560	874,080	24,280
14:00–15:00	1,290	55.13	1,664,100	51,600	928,800	25,800
15:00–16:00	1,190	29.75	1,535,100	1,535,100	856,800	856,800
16:00–17:00	1,260	29.80	1,625,400	1,625,400	907,200	907,200
17:00–18:00	1,188	27.03	1,532,520	1,532,520	855,360	855,360
18:00–19:00	1,134	27.58	1,462,860	1,462,860	816,480	816,480
19:00–20:00	1,172	26.62	1,511,880	1,511,880	843,840	843,840
20:00–21:00	1,254	23.92	1,617,660	1,617,660	902,880	902,880
21:00–22:00	1,124	41.73	1,449,960	1,449,960	809,280	809,280
22:00–23:00	1,072	63.14	–	–	–	–
23:00–24:00	806	67.16	–	–	–	–
Total	–	–	21,617,820	11,179,360	12,065,760	6,221,440

제 5 장 결 론 및 향후 연구과제

5.1 결 론

이 연구는 지능형교통시스템인(ITS)인 통행료자동징수시스템(ETCS) 도입을 전제로 부산광역시내 제1도시고속도로의 도심방향과 부도심방향 본선구간 상에서 실시간 관측 자료를 바탕으로 한 교통류모형과 차량당 통행시간가치를 이용하여 교통류의 상황변화에 따른 가변적인 혼잡통행료를 추정 및 평가하였다.

먼저 이 연구와 관련하여 선행연구 고찰과 더불어 연구대상 도로인 제1도시고속도로에서 상습적으로 정체현상을 보이는 도심방향과 부도심방향의 본선구간 상에서 실시간 교통특성 자료를 수집하여 교통류율, 속도, 밀도 등에 대한 개별 교통특성 분석과 교통특성간 상호관계 분석을 수행하였고, 혼잡통행료 추정에 앞서 속도탄력성과 교통류모형을 고려한 혼잡통행료 산정함수를 도출하였으며, 그 다음으로 연구대상 도로인 제1도시고속도로의 도심방향과 부도심방향 본선구간상 혼잡통행료 추정을 위한 교통류모형을 구축하여 최적의 모형을 선택한 후, 한계임금률법과 한계대체율법을 이용하여 추정된 차량당 통행시간가치를 적용하여 교통류의 혼잡정도에 따른 가변적인 혼잡통행료 추정을 통해 다음과 같은 결론에 도달하게 되었다.

i) 이 연구대상 제1도시고속도로의 도심방향과 부도심방향 본선구간 상에서 교통특성을 분석한 결과, 교통류율 특성은 도심방향과 부도심방향의 모든 지점에서 심야시간대(오후 10:00~익일 06:00)를 제외한 비심야시간대에 지속적인 침두현상을 보이고 있는 것으로 나타났고, 속도 특성은 도심방향의 경우 출·퇴근시간대를 중심으로 약 $30km/h$ 이하, 부도심방향의 경우 퇴근시간대를 중심으로 약 $25km/h$ 이하로 감소하는 것으로 나타났으며, 밀도 특성은 도심방향의 경우 출·퇴근시간대를 중심으로 약 $50pc/km$ 이상, 부도심방향의 경우 퇴근시간대를 중심으로 약 $45pc/km$ 이상으로 증가하는 것으로 나타나 출·퇴근시간대를

중심으로 차량이용수요가 집중하여 도시고속도로의 기능인 이동성 기능을 다하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 출·퇴근시간대를 중심으로 도시고속도로의 본선교통량의 집중도를 적절히 조절하여 차량소통원활화를 도모할 수 있도록 램프미터링시스템의 도입 및 혼잡통행료 부과정책 등과 같은 다양한 교통수요관리방안이 수립되어야 할 것으로 판단되었다.

ii) 이 연구대상 제1도시고속도로의 도심방향과 부도심방향 본선구간 상에서 수집된 교통특성자료를 바탕으로 혼잡통행료 추정을 위한 교통류모형을 구축한 결과, 도심방향과 부도심방향의 모든 지점에서 Greenberg 모형을 제외한 모든 모형의 결정계수(R^2)값이 대체적으로 0.80이상, 표본의 표준편차(S_e)는 대체적으로 7.00이하로 나타나 모형의 설명력이 뛰어난 것으로 나타났고, 회귀모형 및 회귀계수의 유의성 검정 결과 유의수준이 거의 0.000으로 구축된 회귀모형이 적합한 것으로 나타났다. 따라서 최적의 모형은 결정계수 값이 가장 높고 표본의 표준편차가 가장 낮은 Drake 모형(도심방향 : $\delta = 2.4$, 부도심방향 : $\delta = 2.1$)을 선정하였다.

iii) 혼잡통행료 추정시 입력변수로 이용되는 차량당 통행시간가치는 한계임금률법과 한계대체율법을 이용하여 추정한 결과, 한계임금률법에 의한 차량당 통행시간가치(c_1)는 6,826원/대, 한계대체율법에 의한 차량당 통행시간가치(c_2)는 3,818원/대로 추정되어 이를 모두 사용하여 차량당 통행시간가치에 따른 이 연구대상 제1도시고속도로의 본선구간 상에서 교통류의 혼잡정도에 따른 가변적인 혼잡통행료를 추정 및 평가하였다.

iv) 이 연구대상 제1도시고속도로의 도심방향과 부도심방향 본선구간 상에서 교통류모형과 차량당 통행시간가치를 이용하여 혼잡통행료를 추정 및 평가한 결과, 교통류모형에 따라 도심방향과 부도심방향의 혼잡통행료 추정결과가 다소 차이가 있는 것으로 나타나 도심방향과 부도심방향의 공간적 범위에 따라

혼잡정도에 차이가 있음을 판단할 수 있었고, 속도가 높을 때는 혼잡통행료가 낮게 책정되는 반면에 속도가 점차 낮아질수록 혼잡통행료가 높게 책정되는 것으로 나타나 획일적으로 혼잡통행료를 부과하는 것보다 혼잡정도에 따라 가변적으로 혼잡통행료를 부과하는 것이 효율적일 것으로 판단되었다. 특히 교통류율이 최대 교통류율 상태에 도달할 때에는 혼잡통행료가 상당히 높게 책정되는 것으로 나타났는데, 이를 도로이용자에게 부과하게 되면 도로이용자에게 높은 가격부담을 지우게 되어 혼잡통행료 부과정책이 실현가능성이 낮을 수 있지만, 최대 교통류율 상태(즉, 과포화 상태)에서 적은 액수의 혼잡통행료를 부과하더라도 개별 통행당 비용이 증가하여 사회적 비용이 감소를 하게 된다. 따라서 도로이용자의 반발을 최소화하기 위한 일환으로 속도를 계급구간별로 나누어 혼잡통행료를 재 추정한 결과, 속도를 계급구간별로 나누지 않았을 때에 비해 혼잡통행료가 높지 않게 책정되는 것으로 나타나 이 연구에서 적용한 혼잡통행료 추정방법을 이용하여 혼잡통행료 부과정책을 시행할 때에는 속도를 계급구간별로 나누어 혼잡통행료를 책정하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

5.2 향후 연구과제

이 연구는 지능형교통시스템(ITS)인 통행료자동징수시스템(ETCS) 도입을 전제로 하여 부산광역시내 제1도시고속도로 교통축(corridor)을 대상으로 교통류의 상황변화에 따른 가변적인 혼잡통행료 추정 및 평가에 관한 연구로서 이 연구에서 적용한 방법을 이용하여 혼잡통행료 부과정책을 시행할 경우에는 다음과 같은 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

i) 연구대상 도로의 공간적 범위(도심방향, 부도심방향)에 따라 교통류의 혼잡정도가 차이가 있는 것으로 나타난 바, 혼잡통행료 부과정책을 시행하기 위해서는 혼잡통행료 적용대상 도로에 대해서 지속적으로 교통특성자료를 수집하여 혼잡통행료 적용대상 도로의 교통상황을 잘 묘사할 수 있는 교통류모형 구

축에 대한 다양한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

ii) 또한, 차량당 통행시간가치에 따라 혼잡통행료가 다소 차이가 있는 것으로 나타난 바, 혼잡통행료 부과정책을 시행할 경우 차량당 통행시간가치는 한계임금률법의 경우 장래 소득증대에 따른 시간가치를 연도별로 재조정해서 이용해야 할 것으로 판단되었고, 한계대체율법의 경우 혼잡통행료 적용대상 도로를 이용하거나 이용할 것으로 예상되는 도로이용자에 대한 지불의사액(willing to pay, WTP)을 조사하는 등의 보다 세밀한 연구가 뒷받침 되어야 할 것으로 판단되었다.

iii) 마지막으로 이 연구는 연속류 특성을 지닌 도시고속도로를 대상으로 한 corridor 방식의 연구로 향후 단속류 특성을 지닌 도시부 간선도로를 대상으로 한 cordon 방식의 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단되었고, 혼잡통행료 부과정책을 시행할 경우에는 전체 네트워크 차원에서 우회도로 확보 여부, 대체교통수단 확충 여부 등에 대한 전반적인 연구가 다각적으로 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

- 1) 강경우 · 국우각, 속도-밀도모형을 적용한 혼잡통행료 산정; 강변북로 중심으로, 대한교통학회지, 제24권 제2호, 대한교통학회, 2006, pp.31~41.
- 2) 교통개발연구원(KOTI), 수도권 여객통행실태 조사; 개별통행행태모형의 정립을 중심으로, 1997.
- 3) 교통개발연구원(KOTI), 2004년 국가교통 DB구축 사업; 부산 · 울산권, 2004.
- 4) 김태승 · 한상용 · 권태형 · 김건영, 혼잡통행료제도 확대시행의 효과분석; 대산지역 및 BRT 시행에 따른 정책결합을 중심으로, 교통개발연구원(KOTI), 2004.
- 5) 김태희 · 임영태 · 이훈기 · 고용석 · 양인석 · 류근하, 유료도로의 통행시간가치 산정에 관한 연구; 수도권 지역을 중심으로, 국토연구원(KRIHS), 2003.
- 6) 김현 · 오세창 · 최기주, 통행목적별 수단별 통행시간가치도출 및 유의성 검정, 대한교통학회지, 제17권 제1호, 대한교통학회, 1999, pp.113~129.
- 7) 김황배 · 김성수 · 임재경, 서울시 혼잡통행료제도 실시방안에 관한 연구, 교통개발연구원(KOTI), 1996.
- 8) 노정현, 교통계획; 통행수요이론과 모형, 나남출판, 1999.
- 9) 도철웅, 교통공학원론(상), 청문각, 2005.
- 10) 부산광역시, 부산광역시 도시교통정비중기계획(요약보고서), 2005.
- 11) 부산광역시, 2006년도 부산광역시 교통조사(Ⅱ)승객통행량 조사결과, 2007.
- 12) 손봉수 · 황기연, 서울시 혼잡통행료 징수체계 보완 연구, 서울시정개발연구원, 2001.
- 13) 신기숙, 고속도로 혼잡통행료 산출, 한양대학교 대학원, 석사학위논문, 1996.
- 14) 원제무, 대중교통경제론, 보성각, 2001.
- 15) 정일호 · 정선영, 임영태 · 이백진, 효율적인 교통혼잡 통행료 정책 도입방안 연구, 국토연구원(KRIHS), 2006.

- 16) 조남건, 도로사업 투자분석 기법정립, 국토연구원(KRIHS), 1999.
- 17) 조남건, 우리나라 지역간 통행의 시간가치 산출연구, 국토연구 제31권, 국토연구원(KRIHS), 2001, pp.25~38.
- 18) 조한선 · 이동민, 2005년 전국 교통혼잡비용 산출과 추이분석, 한국교통연구원(KOTI), 2007.
- 19) 최재성 · 원제무, 교통공학, 박영사, 1999.
- 20) 한국개발연구원(KDI), 도로 · 철도부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정 · 보완 연구(제4판), 2004.
- 21) 황기연 · 엄진기, 교통수요관리론; 정책 및 분석실무, 청문각, 2001.
- 22) 한국은행, 기업경영분석, 한국은행경제통계시스템, 2006.
- 23) 통계청, 운수업통계조사, 국가통계포털, 2006.
- 24) 노동부, 노동통계조사, 노동통계정보시스템, 2006.
- 25) Becker, G.S., A Theory of the Allocation of Time, Economic Journal, Vol. 75, 1965.
- 26) Beesley, M.E., The Value of Time Spent in Travelling; Some View Evidence, Economica, Vol. 32, 1965.
- 27) Davis, A.L., and Rogers, K.G., Model Choice and The Value of Time, Local Government Operational Research Unit Report No. C. 143, Reaching, 1973.
- 28) De Donnea, F.X., Consumer Behavior Transport Mode and Value of Time; Some Micro Economic Models, Regional and Urban Economics, Vol. 1, 1972.
- 29) De Serpa, A.J., A Theory of the Economics of Time, Economic Journal Vol. 81, 1971, pp.828~846.
- 30) Drake, J.S., Schofer, J.L., and May, A.D., A Statistical Analysis of Speed-Density Hypotheses, Transportation Research Record 154, 1967, pp.53~87.
- 31) Drew, D.R., Deterministic Aspects of Freeway Operations and Control, Highway Research Record 99, 1965, pp.48~58.

- 32) Drew, D.R., Traffic Flow Theory and Control, New York; McGraw-Hill, 1968.
- 33) Dupuit, On Tolls and Transport Charges, Reprinted in Intl, Econ, 1962.
- 34) Edie, L.C., Car-Following and Steady-State Theory for Non-Congested Traffic, Operations Research, Vol. 9, ORSA, Washington, D.C., 1961, pp.66~76.
- 35) Edie, L.C., Flow Theories, in Traffic Science, D.C. Gazis, Editor, Wiley, New York, 1974.
- 36) Edie, L.C., Herman, R., and Lam, T., Observed Multilane Speed Distributions and the Kinetic Theory of Vehicular Traffic, Transportation Science, Vol. 14, 1980, pp.55~76.
- 37) Ellis, R., Analysis of Linear Relationships in Speed-Density and Speed-Occupancy Curve, Report, Northwestern University, Evanston, IL, 1964.
- 38) Else, P.K., A Reformulation of The Theory of Optimal Congestion Taxes, Journal of Transport Economics and Policy, 1981, pp.217~232.
- 39) Garber, N.J., and Hoel, L.A., Traffic and Highway Engineering, West Publishing Company, 1988.
- 40) Gartner, N., Messer, C.J., and Rathi, A.K., Traffic Flow Theory; A Monograph, Special Report 165, Revised Edition, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1997.
- 41) Gerlough, D.L., and Huber, M.L., Traffic Flow Theory; A Monograph, Special Report 165, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1975.
- 42) Greenberg, H., An Analysis of Traffic Flows, Operations Research, Vol. 7, ORSA, Washington, D.C., 1959, pp.78~85.
- 43) Greenshields, B.D., A Study of Traffic Capacity, Proceedings of the Highway Research Board, Vol. 14, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1935, pp.448~477.

- 44) Holden, D.J., Wardrop's Third Principle; Urban Traffic Congestion and Traffic Policy, Journal of Transport Economics and Policy, 1989, pp.239~262.
- 45) Johansson B., Principles of Road Pricing, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- 46) Li, M.Z.F., Estimating Congestion Toll by Using Traffic Count Data; Singapore's Area Licensing Scheme, Transportation Research Part E 35, 1999, pp.1~10.
- 47) Li, M.Z.F., The Role of Speed-Flow Relationship in Congestion Pricing Implementation with an Application to Singapore, Transportation Research Part B 36, 2002, pp.731~754.
- 48) Lisco, T., The Value of Commuter's Travel Time; A Study in Urban Transportation, Unpublished Dissertation, University of Chicago, 1967.
- 49) Nash, C.A., A Reformulation of The Theory of Optimal Congestion Taxes; A Comment, Journal of Transport Economics and Policy, 1982.
- 50) May, A.D., Traffic Flow Fundamentals, Prentice-Hall, 1990.
- 51) Mcshane, W.R., Roess, R.P., and Prassas, E.S., Traffic Engineering, Second Edition, Prentice-Hall, 1998.
- 52) Oum, T.H., Dodgson, J.S., Hensher, D.A., Morrison, S.A., Nash, C.A., Small, K.A., Waters II, W.G., Transportation Economics; Selected Readings, Korea Research Foundation for the 21st Century, 1995.
- 53) Pigou, A.C., The Economics of Welfare, MacMillian, London, 1920.
- 54) Pipes, L.A., and Munjal, P.K., Propagation of On-ramp Density Perturbations on Unidirectional and Two- and Three- lane Freeway. Transportation Research, Vol. 5, 1971, pp.241~255.
- 55) Small, K., Urban Transportation Economics, Philadelphia, PA; Hawood Academic Publishers, 1992.

- 56) The Federal Highway Administration, HERS; Highway Economic Requirements System, 1994.
- 57) The U.K. Highway Agency, COBA10 Manual, 2002.
- 58) Underwood, R.T., Speed, Volume, and Density Relationships; Quality and Theory of Traffic Flow. Yale Bureau of Highway Traffic, New Haven, CT, 1961, pp.141~188.
- 59) Verhoef, E.T., Emmerink, R.H.M., Nijkamp, P., Rietveld, P., Information provision, flat and fine congestion tolling and the efficiency of road usage, *Regional Science and Urban Economics* 26, 1996, pp.505~529.
- 60) Walters, A.A., The Theory and Measurement of Private and Social Cost of Highway Congestion, *Econometrica* 29, 1961, pp.676~699.
- 61) Wohl, M., and Hendrickson, C., *Transportation Investment and Pricing Principles; an Introduction for Engineers, Planners and Economists*, John Wiley and Son, New York, 1984.

Appendix

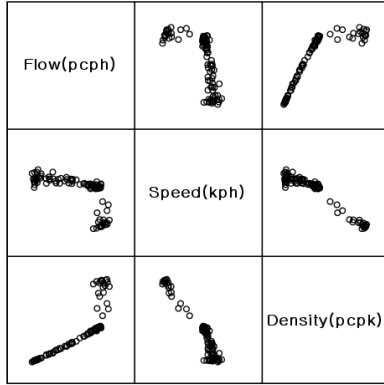
Appendix A. Flow-speed-density scatter-plot matrices

Appendix B. Re-specifications of speed-density and flow-speed function relationships

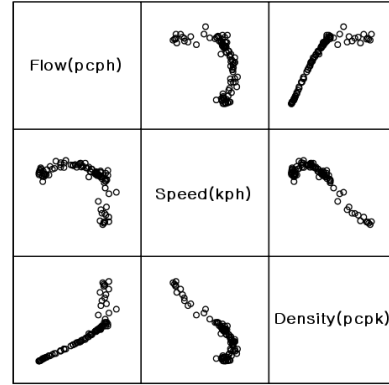
Appendix C. Speed elasticity of flow and congestion toll estimations for flow-speed models

Appendix A. Flow-speed-density scatter-plot matrices

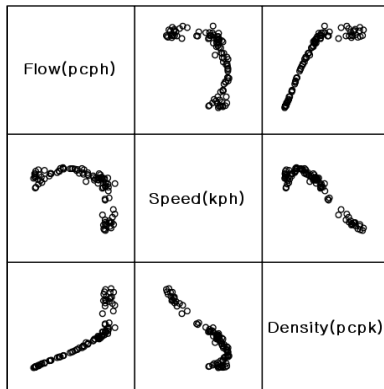
1. Inbound



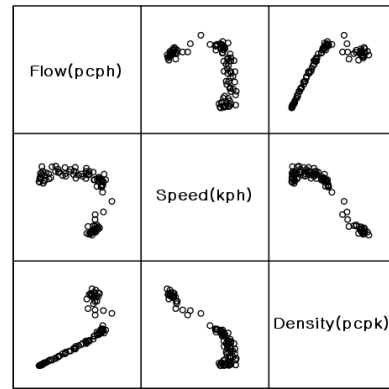
(a) Monday



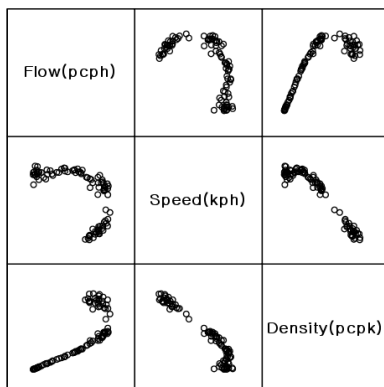
(b) Tuesday



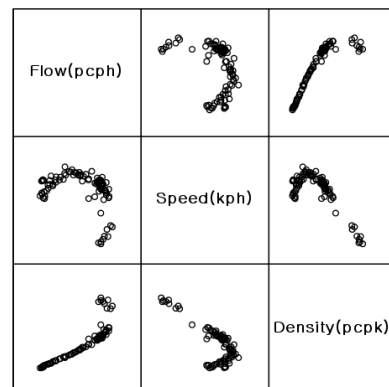
(c) Wednesday



(d) Thursday

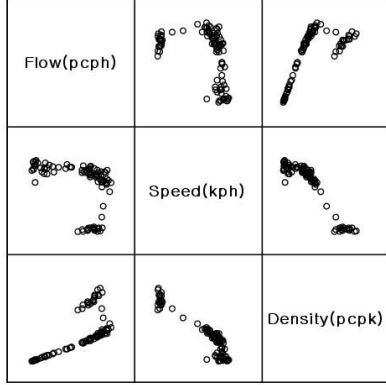


(e) Friday

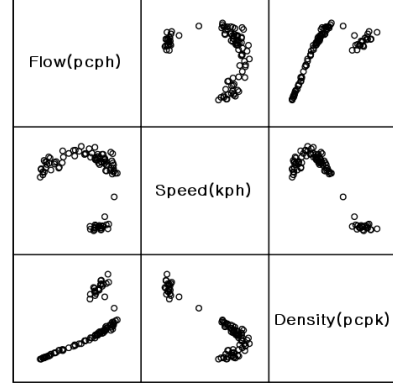


(f) Saturday

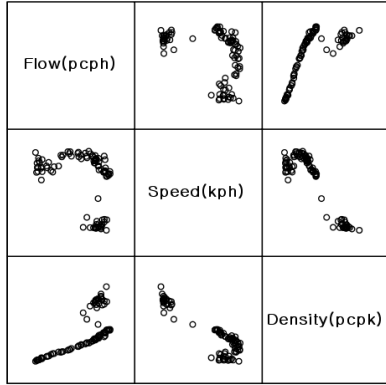
2. Outbound



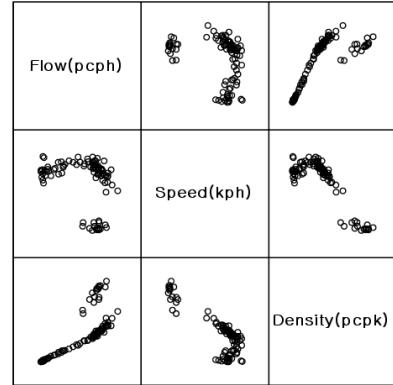
(a) Monday



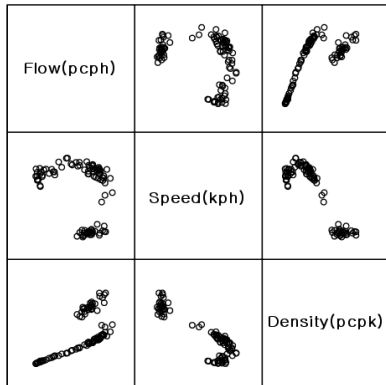
(b) Tuesday



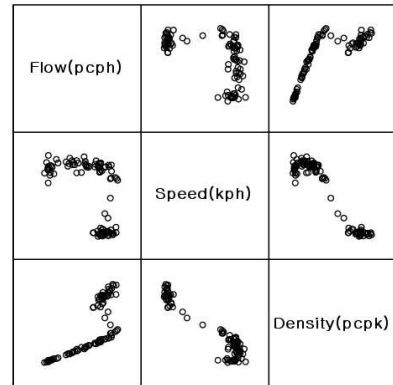
(c) Wednesday



(d) Thursday



(e) Friday



(f) Saturday

Appendix B. Re-specifications of speed-density and flow-speed function relationships

1. Greenshields type model

1) Speed-density function

$$\begin{aligned}
 k &= k_j \left(1 - \frac{u}{u_f}\right)^{\frac{1}{\beta}} \\
 &= (1 + \beta)^{\frac{1}{\beta}} k_m \left[1 - \frac{u}{(1 + \beta)u_m/\beta}\right]^{\frac{1}{\beta}} \\
 &= k_m \left\{ (1 + \beta) \left[1 - \frac{\beta u}{(1 + \beta)u_m}\right] \right\}^{\frac{1}{\beta}} \\
 &= k_m \left(1 + \beta - \beta \frac{u}{u_m}\right)^{\frac{1}{\beta}}
 \end{aligned}$$

2) Speed-flow function

$$\begin{aligned}
 q &= u \cdot k \\
 &= u k_m \left(1 + \beta - \beta \frac{u}{u_m}\right)^{\frac{1}{\beta}} \\
 &= u \left(\frac{q_m}{u_m}\right) \left(1 + \beta - \beta \frac{u}{u_m}\right)^{\frac{1}{\beta}} \\
 &= q_m \left(\frac{u}{u_m}\right) \left(1 + \beta - \beta \frac{u}{u_m}\right)^{\frac{1}{\beta}}
 \end{aligned}$$

2. Underwood type model

1) Speed-density function

$$\begin{aligned}
 k &= k_m \left(\delta \ln \frac{u_f}{u}\right)^{\frac{1}{\delta}} = k_m [\delta (\ln u_f - \ln u)]^{\frac{1}{\delta}} \\
 &= k_m \left\{ \delta [\ln (e^{1/\delta} u_m) - \ln u] \right\}^{\frac{1}{\delta}} \\
 &= k_m \left\{ \delta [\ln e^{1/\delta} + \ln u_m - \ln u] \right\}^{\frac{1}{\delta}} \\
 &= k_m [\delta (1/\delta + \ln u_m - \ln u)]^{\frac{1}{\delta}} \\
 &= k_m \left(1 + \delta \ln \frac{u_m}{u}\right)^{\frac{1}{\delta}}
 \end{aligned}$$

2) Speed-flow function

$$\begin{aligned}
 q &= u \cdot k \\
 &= u k_m \left(1 + \delta \ln \frac{u_m}{u}\right)^{\frac{1}{\delta}} \\
 &= u \left(\frac{q_m}{u_m}\right) \left(1 + \delta \ln \frac{u_m}{u}\right)^{\frac{1}{\delta}} \\
 &= q_m \left(\frac{u}{u_m}\right) \left(1 + \delta \ln \frac{u_m}{u}\right)^{\frac{1}{\delta}}
 \end{aligned}$$

3. Greenberg model

1) Speed-density function

$$\begin{aligned}
 k &= k_j e^{-\frac{u}{u_m}} \\
 &= e k_m e^{-\frac{u}{u_m}} \\
 &= k_m e^{1 - \frac{u}{u_m}}
 \end{aligned}$$

2) Speed-flow function

$$\begin{aligned}
 q &= u \cdot k = u k_m e^{1 - \frac{u}{u_m}} \\
 &= u \left(\frac{q_m}{u_m}\right) e^{1 - \frac{u}{u_m}} \\
 &= q_m \left(\frac{u}{u_m}\right) e^{1 - \frac{u}{u_m}}
 \end{aligned}$$

Appendix C. Speed elasticity of flow and congestion toll estimations for flow-speed models

1. Greenshields type model

1) Speed elasticity of flow

$$\epsilon_u^q = \frac{u}{q} \cdot \frac{dq}{du}, \quad q = q_m \left(\frac{u}{u_m} \right) \left(1 + \beta - \beta \frac{u}{u_m} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

$$\begin{aligned} \frac{dq}{du} &= q_m \left(\frac{1}{u_m} \right) \left(1 + \beta - \beta \frac{u}{u_m} \right)^{\frac{1}{\beta}} + q_m \left(\frac{u}{u_m} \right) \left(\frac{1}{\beta} \right) \left(1 + \beta - \beta \frac{u}{u_m} \right)^{\frac{1}{\beta} - 1} \left(-\frac{\beta}{u_m} \right) \\ &= q_m \left(\frac{u}{u_m} \right) \left(1 + \beta - \beta \frac{u}{u_m} \right)^{\frac{1}{\beta}} \left[\frac{1}{u} - \frac{1}{u_m} \left(1 + \beta - \beta \frac{u}{u_m} \right)^{-1} \right] \\ &= q \left[\frac{1}{u} - \frac{1}{u_m} \frac{u_m}{(1 + \beta)u_m - \beta u} \right] \\ &= \frac{q}{u} \left[1 - \frac{u}{(1 + \beta)u_m - \beta u} \right] \\ &= \frac{q}{u} \left[\frac{(1 + \beta)u_m - (1 + \beta)u}{(1 + \beta)u_m - \beta u} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_u^q &= \frac{u}{q} \cdot \frac{dq}{du} \\ &= \frac{u}{q} \cdot \frac{q}{u} \left[\frac{(1 + \beta)u_m - (1 + \beta)u}{(1 + \beta)u_m - \beta u} \right] \\ &= \frac{(1 + \beta)u_m - (1 + \beta)u}{(1 + \beta)u_m - \beta u} \\ &= \frac{u_m - u}{u_m - \frac{\beta}{1 + \beta}u} \end{aligned}$$

$$\therefore \epsilon_u^q = \frac{u_m - u}{u_m - \frac{\beta}{1 + \beta}u}$$

2) Congestion toll estimation

$$r = -\frac{c}{u} \cdot \frac{1}{\epsilon_u^q} = -\frac{c}{u} \cdot \frac{u_m - \frac{\beta}{1 + \beta}u}{u_m - u}$$

$$\therefore r = \frac{c}{u} \cdot \frac{u_m - \frac{\beta}{1 + \beta}u}{u - u_m}$$

2. Underwood type model

1) Speed elasticity of flow

$$\begin{aligned}
 \epsilon_u^q &= \frac{u}{q} \cdot \frac{dq}{du}, & q &= q_m \left(\frac{u}{u_m} \right) \left(1 + \delta \ln \frac{u_m}{u} \right)^{\frac{1}{\delta}} = q_m \left(\frac{u}{u_m} \right) [1 + \delta(\ln u_m - \ln u)]^{\frac{1}{\delta}} \\
 \frac{dq}{du} &= q_m \left(\frac{1}{u_m} \right) [1 + \delta(\ln u_m - \ln u)]^{\frac{1}{\delta}} + q_m \left(\frac{u}{u_m} \right) \left(\frac{1}{\delta} \right) [1 + \delta(\ln u_m - \ln u)]^{\frac{1}{\delta}-1} \left(-\frac{\delta}{u} \right) \\
 &= q_m \left(\frac{u}{u_m} \right) [1 + \delta(\ln u_m - \ln u)]^{\frac{1}{\delta}} \left\{ \frac{1}{u} - \frac{1}{u} [1 + \delta(\ln u_m - \ln u)]^{-1} \right\} \\
 &= q \left\{ \frac{1}{u} - \frac{1}{u} [1 + \delta(\ln u_m - \ln u)]^{-1} \right\} \\
 &= \frac{q}{u} \left[1 - \frac{1}{1 + \delta(\ln u_m - \ln u)} \right] \\
 &= \frac{q}{u} \left[\frac{\delta(\ln u_m - \ln u)}{1 + \delta(\ln u_m - \ln u)} \right] \\
 \epsilon_u^q &= \frac{u}{q} \cdot \frac{dq}{du} \\
 &= \frac{u}{q} \cdot \frac{q}{u} \left[\frac{\delta(\ln u_m - \ln u)}{1 + \delta(\ln u_m - \ln u)} \right] \\
 &= \frac{\delta(\ln u_m - \ln u)}{1 + \delta(\ln u_m - \ln u)} \\
 \therefore \epsilon_u^q &= \frac{\delta \ln \frac{u_m}{u}}{1 + \delta \ln \frac{u_m}{u}}
 \end{aligned}$$

2) Congestion toll estimation

$$\begin{aligned}
 r &= -\frac{c}{u} \cdot \frac{1}{\epsilon_u^q} = -\frac{c}{u} \cdot \frac{1 + \delta(\ln u_m - \ln u)}{\delta(\ln u_m - \ln u)} \\
 &= -\frac{c}{u} \cdot \frac{\delta[\ln(u_m e^{1/\delta}) - \ln u]}{\delta(\ln u_m - \ln u)} \\
 &= \frac{c}{u} \cdot \frac{\ln(u_m e^{1/\delta}) - \ln u}{\ln u - \ln u_m} \\
 \therefore r &= \frac{c}{u} \cdot \frac{\ln(u_m e^{1/\delta}) - \ln u}{\ln u - \ln u_m}
 \end{aligned}$$

3. Greenberg model

1) Speed elasticity of flow

$$\begin{aligned}\epsilon_u^q &= \frac{u}{q} \cdot \frac{dq}{du}, & q &= q_m \left(\frac{u}{u_m} \right) e^{1 - \frac{u}{u_m}} \\ \frac{dq}{du} &= q_m \left(\frac{1}{u_m} \right) e^{1 - \frac{u}{u_m}} + q_m \left(\frac{u}{u_m} \right) \left(-\frac{1}{u_m} \right) e^{1 - \frac{u}{u_m}} \\ &= q_m \left(\frac{u}{u_m} \right) e^{1 - \frac{u}{u_m}} \left[\frac{1}{u} - \frac{1}{u_m} \right] \\ &= q \left(\frac{1}{u} - \frac{1}{u_m} \right) \\ &= \frac{q}{u} \left(1 - \frac{u}{u_m} \right) \\ &= \frac{q}{u} \left(\frac{u_m - u}{u_m} \right) \\ \epsilon_u^q &= \frac{u}{q} \cdot \frac{dq}{du} \\ &= \frac{u}{q} \cdot \frac{q}{u} \left(\frac{u_m - u}{u_m} \right) \\ &= \frac{u_m - u}{u_m} \\ \therefore \quad \epsilon_u^q &= \frac{u_m - u}{u_m}\end{aligned}$$

2) Congestion toll estimation

$$\begin{aligned}r &= -\frac{c}{u} \cdot \frac{1}{\epsilon_u^q} = -\frac{c}{u} \cdot \frac{u_m}{u_m - u} \\ &= \frac{c}{u} \cdot \frac{u_m}{u - u_m} \\ \therefore \quad r &= \frac{c}{u} \cdot \frac{u_m}{u - u_m}\end{aligned}$$

감사의 글

한국해양대학교와 인연을 맺은 지도 이제 20여년정도가 되어가는 것 같습니다. 석사과정을 마친 후 현업에 종사하면서 다양한 경험을 하였지만 너무나 많은 부분이 부족함을 느껴 새로운 도전을 하고자 박사과정에 진학하였는데 3년이라는 시간이 훌쩍 흘러 하나의 결실을 맺고자 합니다.

먼저 이 논문이 나오기까지 부족한 제자에게 아낌없는 지도편달과 함께 사랑이란 삶의 지혜를 주신 김태곤 교수님과 사모님께 감사드립니다. 또 직접 심사를 맡으셔서 여러 가지 조언을 해 주신 이종우 교수님, 경갑수 교수님, 김태형 교수님, 부산발전연구원의 이상국 박사님과 물류시스템 공학과 교수님들께 이 지면을 빌어 감사를 드리고자 합니다.

또한, 박사과정 생활을 하는 동안 먼 거리에서도 주저하지 않고 연구실까지 찾아와 주셔서 따뜻한 마음을 베풀어준 현철선배, 은진선배, 광식선배, 동수선배, 인영선배와 후배 인식, 양주, 동환, 태준, 순범, 지형이 에게도 감사를 전하고, 연구실에 있는 동안 항상 저를 잘 따르고 논문 자료관측에 큰 힘이 되어준 후배 종진, 종만, 병근이와 항상 밝은 미소로 세심한 배려를 해준 후배 미현, 유나, 기홍, 소연, 술이 에게도 감사를 전합니다.

같은 공간에서 공부를 하지는 않았지만 항상 서로를 격려해 주었던 구조연구실의 순철, 토질연구실의 수정, 해안연구실의 지민이 에게도 감사를 전하고, 제가 현업에 종사하면서 저에게 많은 실무를 가르쳐 주셨던 권경구 부사장님, 서태문 사장님, 김재현 이사님, 김광욱 계장님과 주변의 동료들에게도 감사를 전하며, 친형제는 아니지만 제가 항상 잘되길 바라는 유청이 형, 친구 강민, 경빈, 화준, 창래와 주변의 선후배들에게도 이 지면으로나마 감사를 전합니다.

마지막으로 부족한 저를 지금 이 자리까지 이끌어 주시기 위해서 밤낮으로
고생하신 어머님과 형님가족 그리고 누님가족에게도 감사드리고, 지금은 볼 수
없지만 항상 저의 가슴속에 자리 잡고 계시는 아버님 영전에 이 논문을 바치고
자 합니다.

2008년 8월